

Caractérisation physico-chimique de eaux de puits et forages destinées à la consommation humaine dans la commune Makiso à Kisangani (RDC) durant la saison pluvieuse

Moussa Issoufou Djibo

Mastérint, 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

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

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.v22n18p130](https://doi.org/10.19044/esj.2026.v22n18p130)

Submitted: 23 April 2026

Accepted: 02 June 2026

Published: 30 June 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., & Dowiya Nzawe, B. (2026). *Caractérisation physico-chimique de eaux de puits et forages destinées à la consommation humaine dans la commune Makiso à Kisangani (RDC) durant la saison pluvieuse*. European Scientific Journal, ESJ, 22 (18), 130.

<https://doi.org/10.19044/esj.2026.v22n18p130>

Résumé

Dans la commune Makiso à Kisangani, les puits et les forages constituent une source importante d'approvisionnement en eau pour les populations en raison de l'insuffisance du réseau public de distribution. Cette étude vise à évaluer les caractéristiques physico-chimiques des eaux

souterraines destinées à la consommation humaine durant la saison pluvieuse. Cinq puits et cinq forages ont été suivis au cours de trois campagnes d'échantillonnage réalisées en novembre 2025, soit trente échantillons analysés. Les paramètres étudiés comprenaient la température, le pH, la conductivité électrique, la turbidité, la dureté totale, les nitrates, les nitrites, le fer total et les chlorures. Les analyses ont été réalisées selon les méthodes normalisées et les résultats comparés aux valeurs guides de l'OMS. Les résultats révèlent une faible minéralisation des eaux, caractérisée par de faibles valeurs de conductivité électrique. Le pH indique toutefois un caractère acide, variant de 4,9 à 5,2 dans les puits et de 5,1 à 6,1 dans les forages. Les concentrations en nitrates, chlorures et dureté totale demeurent globalement conformes aux recommandations internationales. En revanche, certains puits, notamment P2, présentent des teneurs élevées en nitrites (0,21 mg/L), en fer total (1,49 mg/L) ainsi qu'une turbidité atteignant 38,7 NTU. Les analyses multivariées (ACP et CHA) mettent en évidence une distinction entre les puits et les forages, les premiers apparaissant plus sensibles aux influences anthropiques et aux apports de surface. Ces résultats montrent que les forages présentent globalement des caractéristiques plus favorables, tandis que certains puits nécessitent un suivi régulier et des mesures de protection adaptées.

Mots-clés: Qualité de l'eau ; Eaux souterraines ; Puits ; Forages ; Paramètres physico-chimiques ; Saison pluvieuse ; Kisangani ; RDC ; OMS

Physico-chemical Characterization of Well and Borehole Water Intended for Human Consumption in Makiso Municipality, Kisangani (DRC), During the Rainy Season

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 Saïle Isaka

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

Pascaline Likango Lutha

PhD Candidate, Department of Chemistry and Agricultural Industries,
Faculty Institute of Agronomic Sciences of Yangambi (IFA-Yangambi),
Kisangani, DR Congo

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

In Makiso Municipality, Kisangani, wells and boreholes constitute important sources of water supply due to the inadequacy of the public water distribution network. This study aimed to assess the physicochemical characteristics of groundwater used for human consumption during the rainy season. Five wells and five boreholes were monitored through three sampling campaigns conducted in November 2025, resulting in a total of 30 water samples. The parameters analyzed included temperature, pH, electrical conductivity, turbidity, total hardness, nitrates, nitrites, total iron, and chlorides. Analyses were performed using standard methods, and the results were compared with World Health Organization (WHO) guideline values. The findings revealed low mineralization, as indicated by low electrical conductivity values. However, pH measurements showed acidic conditions, ranging from 4.9 to 5.2 in wells and from 5.1 to 6.1 in boreholes. Nitrate, chloride, and total hardness concentrations generally complied with international drinking-water standards. In contrast, some wells, particularly P2, exhibited elevated levels of nitrites (0.21 mg/L), total iron (1.49 mg/L),

and turbidity (38.7 NTU). Multivariate analyses, including Principal Component Analysis (PCA) and Hierarchical Cluster Analysis (HCA), highlighted a clear distinction between wells and boreholes, with wells appearing more vulnerable to anthropogenic influences and surface contamination. Overall, borehole water showed more favorable physicochemical characteristics, whereas some wells require regular monitoring and appropriate protection measures.

Keywords: Water quality; Groundwater; Wells; Boreholes; Physico-chemical parameters; Rainy season; Kisangani; DRC; WHO

Introduction

L'eau est une ressource naturelle indispensable à la vie des êtres humains, des animaux et végétaux (Hane et *al.*, 2020 ; Kahoul et *al.*, 2014). Sa qualité, tout comme sa quantité est essentielle pour la protection de la santé de l'Homme. Elle devient une source de maladies lorsqu'elle est contaminée par des déchets, qu'ils soient ménagers, industriels, agricoles ou organiques. Cette ressource vitale mérite une attention particulière, car elle est fortement exposée aux impacts des activités humaines (Kahoul et *al.*, 2014).

En réalité, la forte croissance démographique, associée à une urbanisation rapide, est souvent à l'origine de nombreuses perturbations écosystémiques naturelles (McKinney, 2002). Cependant, les causes principales de la pollution de l'eau par les substances chimiques (nitrates, les phosphates et les pesticides) sont liées à l'utilisation des engrais, des pesticides et des fumiers ; mais aussi le manque de la sensibilisation de la population envers la gestion durable de l'environnement (FAO, 2026).

La garantie de la santé des populations repose sur trois éléments fondamentaux à savoir : un accès fiable à l'eau potable, des systèmes d'assainissement efficaces et une gestion durable de la ressource d'eau. Selon l'OMS, près de 10% des maladies pourraient être évitées simplement en améliorant ces domaines, ce qui limiterait la propagation des maladies liées à l'eau (OMS, 2023).

Dans la commune Makiso, les eaux de puits et de forages constituent une source d'approvisionnement incontournable en eau de boissons pour de nombreux foyers. Face à l'urbanisation rapide qui dépasse les capacités de la Régie de distribution d'Eau (REGIDESO) à fournir l'eau potable pour ladite population, les habitants sont obligés de se tourner vers des solutions alternatives (les eaux de forages et de puits). Ces sources locales d'eau comblent désormais les besoins essentiels des ménages en matière de : l'eau de boisson, de cuisson, et de lavage.

C'est dans ce contexte que la présente étude a pour objectif : l'évaluation de la qualité physico-chimique des eaux de puits et de forages

consommé à Makiso Kisangani. Elle se base sur les mesures de la température, du pH, de la conductivité électrique, la couleur, l'odeur, la turbidité et sur les dosages du fer, de la dureté totale, des ions chlorures, des nitrates et des nitrites.

Matériel et méthodes

Présentation de la zone d'étude

La ville de Kisangani, chef-lieu de la province de la Tshopo, est située au Nord-Est de la République Démocratique du Congo (RDC), elle s'étend sur une superficie de 1910 Km² et elle compte 853 616 habitants (UN-Habitat, 2026). Administrativement, elle est divisée en six (6) communes urbaines : Makiso, Kisangani, Tshopo, Mangobo, Kabondo et Lubunga (ACF, 2009).

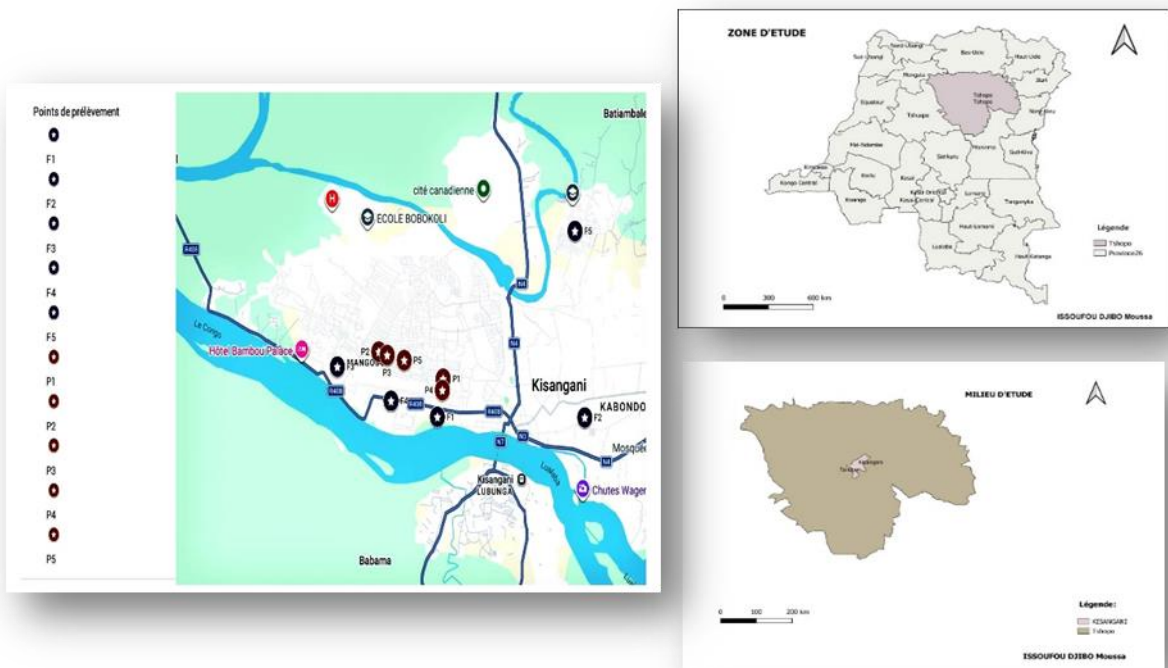


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

Échantillonnage

Les échantillons analysés étaient constitués des eaux de cinq (5) puits et de cinq (5) forages utilisés pour la consommation humaine dans la commune Makiso à Kisangani. Les prélèvements ont été réalisés durant le mois de novembre 2025 correspondant à la saison pluvieuse. Trois campagnes d'échantillonnage ont été effectuées au cours de cette période, soit un total de trente (30) échantillons analysés.

Les échantillons ont été collectés entre 7h00 et 14h00 (GMT+2) à l'aide de bouteilles en polyéthylène de 750 mL préalablement lavées au détergent, rincées à l'eau distillée puis rincées trois fois avec l'eau à analyser avant le prélèvement, conformément aux recommandations d'AQUAREF (2011). Après prélèvement, les échantillons ont été conservés dans une glacière contenant des glaçons à une température d'environ 4 °C puis transportés au laboratoire central d'analyses des eaux de la REGIDESO pour les analyses physico-chimiques (Rodier et al., 2009).

Méthodes d'analyses physico-chimiques

Le Tableau 1 présente les différents paramètres physico-chimiques analysés ainsi que les méthodes analytiques utilisées.

Tableau 1 : Méthodes d'analyses physico-chimiques des eaux de puits et de forages

Paramètres	Méthodes	Références (normes/auteurs)
pH	Mesure in situ à l'aide d'un multimètre portable Hach HQ40d et Hanna Instruments HI 98128	Yéo et al. (2023)
Température (°C)	Mesure in situ à l'aide d'un multimètre portable	Yéo et al. (2023)
Conductivité électrique (µS/cm)	Mesure in situ à l'aide d'un conductimètre portable	Yéo et al. (2023)
Couleur et odeur	Évaluation sensorielle à l'aide des organes de sens	Tchoumou et al. (2023)
Turbidité (NTU)	Mesure quantitative à l'aide d'un turbidimètre optique	ISO 7027-1:2016
Dureté totale (TH) mg/L	Dosage complexométrique à l'EDTA avec le Noir Ériochrome T	ISO 6059:1984
Nitrates (NO ₃ ⁻) mg/L	Méthode de réduction au cadmium avec spectrophotomètre HACH	ISO 6740:1985
Nitrites (NO ₂ ⁻) mg/L	Méthode par diazotation avec spectrophotomètre HACH	ISO 6777:1984
Fer total (Fe) mg/L	Méthode spectrométrique à la phénanthroline-1,10	ISO 6332:1988
Chlorures (Cl ⁻) mg/L	Méthode argentimétrique (méthode de Mohr)	ISO 9297:1989

Analyses statistiques

Les données collectées ont été soumises à des analyses statistiques descriptives ainsi qu'à des analyses multivariées comprenant l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) basée sur la distance euclidienne moyenne. Ces analyses ont été réalisées à l'aide des logiciels R version 4.3.3 et Microsoft Excel 2016.

L'Analyse en Composantes Principales a été utilisée 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 Classification Hiérarchique Ascendante a permis de regrouper les points d'eau présentant des caractéristiques physico-chimiques similaires.

Résultats

Température

La Figure 2 présente les températures moyennes enregistrées dans les eaux de puits et de forages étudiées durant la saison pluvieuse. Les températures variaient entre 26,3 et 27,0 °C dans les puits et entre 26,5 et 27,2 °C dans les forages. L'ensemble des valeurs enregistrées était supérieur à la valeur indicative recommandée par l'Organisation mondiale de la Santé (OMS), fixée à 25 °C.

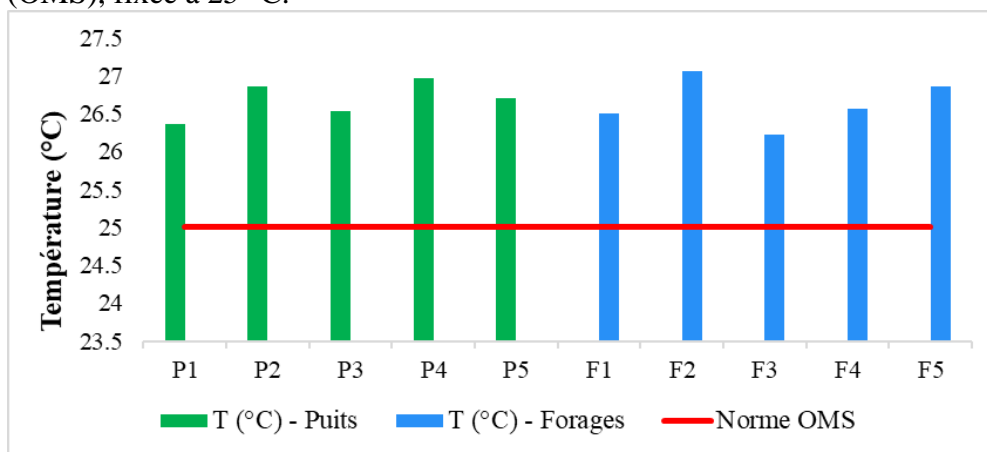


Figure 2 : Variation de la température des eaux de puits (P) et de forages (F) étudiées durant la saison pluvieuse

Potentiel d'hydrogène (pH)

La Figure 3 présente les valeurs moyennes du potentiel d'hydrogène (pH) des eaux de puits et de forages étudiées durant la saison pluvieuse. Les valeurs du pH des eaux de puits variaient entre 4,9 et 5,2, tandis que celles des eaux de forages s'échelonnaient entre 5,0 et 6,13. Les eaux de forages présentaient globalement des valeurs de pH légèrement plus élevées que celles des puits.

Les données observées restaient inférieures aux normes de potabilité recommandées par l'OMS, comprises entre 6,5 et 8,5, indiquant ainsi un caractère acide des eaux étudiées.

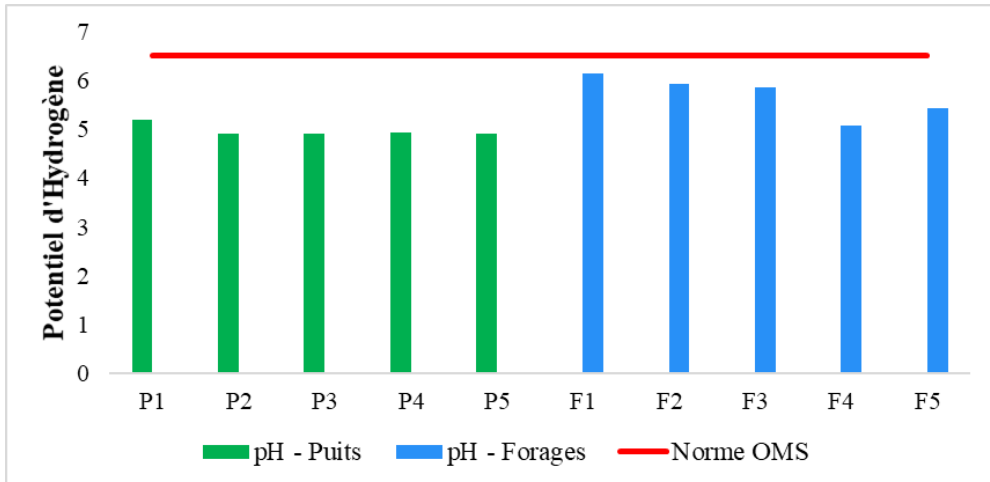


Figure 3 : Variation du potentiel d'hydrogène (pH) des eaux de puits (P) et de forages (F) étudiées durant la saison pluvieuse

Conductivité électrique et ions chlorures

Les valeurs moyennes de la conductivité électrique des eaux étudiées durant la saison pluvieuse sont présentées à la Figure 4. Les valeurs observées variaient entre 83,46 et 285,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans les puits et entre 79,9 et 218,93 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans les forages.

Par ailleurs, les concentrations moyennes en ions chlorures variaient entre 20,83 et 83,38 mg/L dans les eaux de puits et entre 0,46 et 18,47 mg/L dans les eaux de forages.

L'ensemble des valeurs enregistrées demeurait inférieur aux limites recommandées par l'OMS, fixées à 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la conductivité électrique et à 250 mg/L pour les ions chlorures.

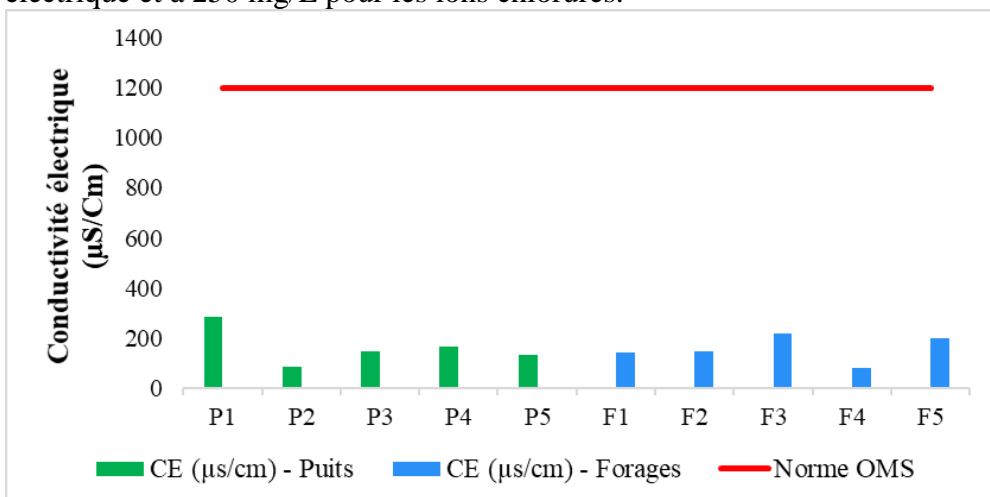


Figure 4 : Variation de la conductivité électrique des eaux de puits (P) et de forages (F) étudiées durant la saison pluvieuse

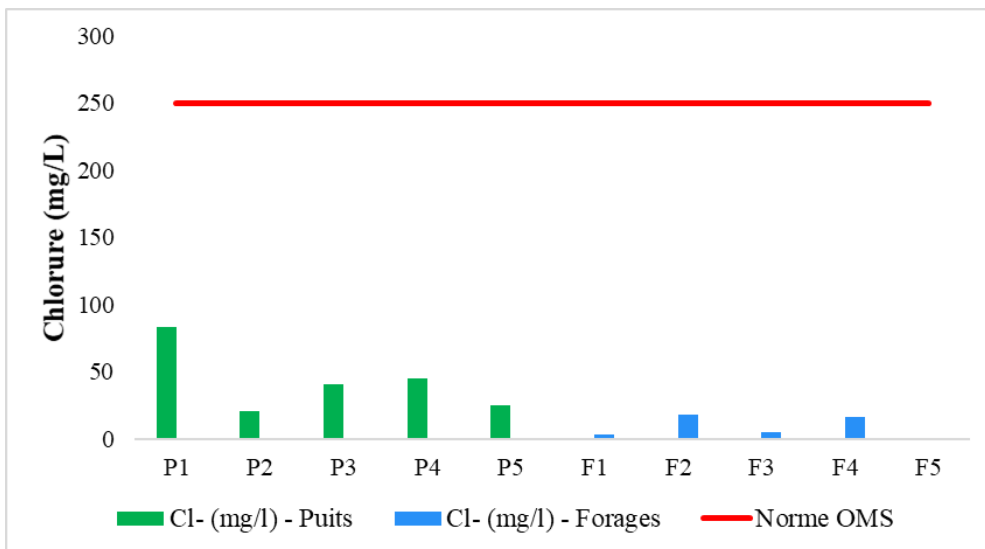


Figure 5 : Variation des ions chlorures des eaux de puits (P) et forages (F) étudiées durant la saison pluvieuse

Turbidité

Les résultats de la turbidité des eaux étudiées durant la saison pluvieuse sont présentés à la Figure 6. Les eaux de forages présentaient de faibles valeurs de turbidité, comprises entre 1,1 et 3,13 NTU. En revanche, les eaux de puits montraient des valeurs plus élevées, avec des moyennes atteignant jusqu'à 38,7 NTU dans certains points d'eau.

Les eaux de forages respectaient globalement la limite de turbidité fixée pour l'eau potable (< 5 NTU) pour les eaux destinées à la consommation humaine. À l'inverse, plusieurs puits présentaient des valeurs supérieures à cette norme.

Par ailleurs, aucune coloration ni odeur particulière n'a été observée dans la majorité des points d'eau lors des observations de terrain réalisées au moment des prélèvements.

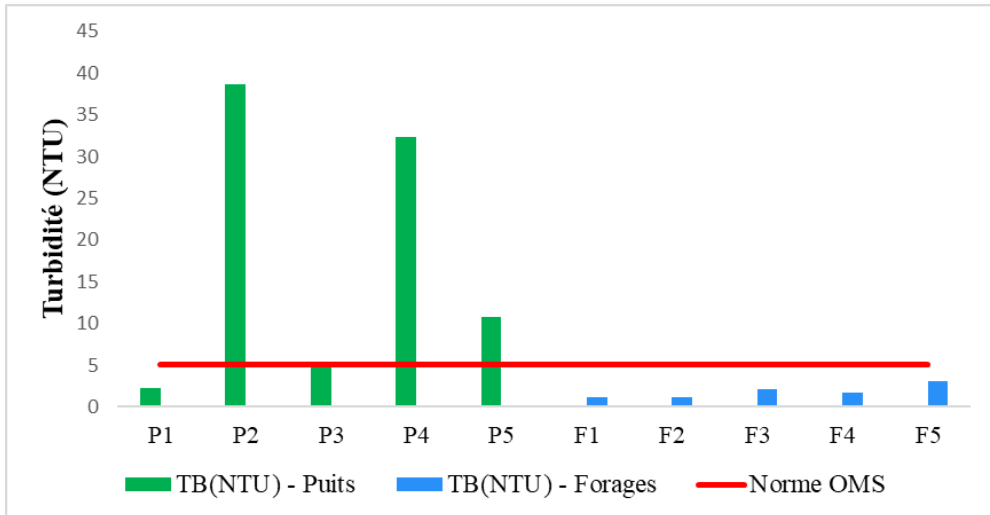


Figure 6 : Variation de la turbidité des eaux de puits (P) et de forages (F) étudiées durant la saison pluvieuse

Dureté totale ou titre hydrotimétrique (TH)

Les résultats de la dureté totale des eaux étudiées durant la saison pluvieuse sont présentés à la Figure 7. Les valeurs moyennes de la dureté totale variaient entre 6 et 24,33 mg/L dans les eaux de puits et entre 12 et 57,33 mg/L dans les eaux de forages.

L'ensemble des valeurs enregistrées demeurait inférieur aux limites recommandées par l'OMS pour les eaux destinées à la consommation humaine, généralement comprises entre 100 et 300 mg/L. Les eaux étudiées présentaient ainsi une faible dureté, traduisant un caractère globalement très doux.

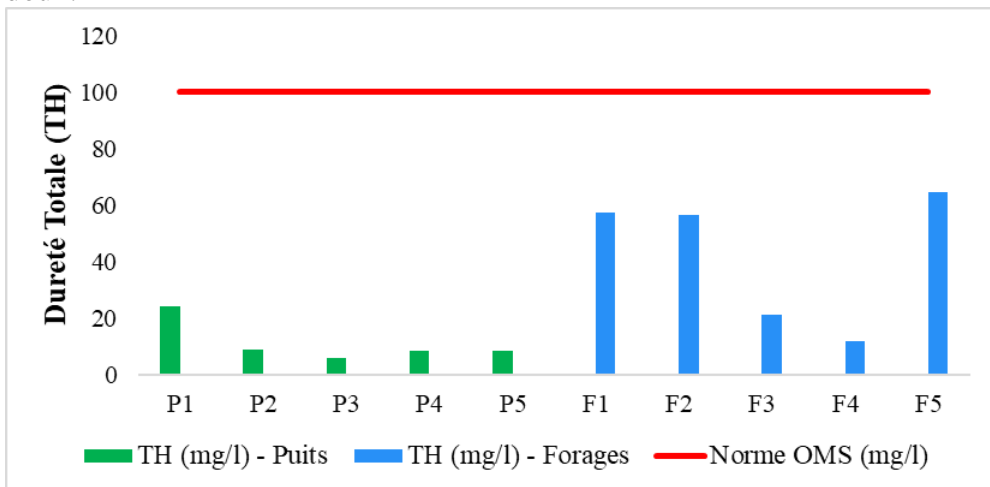


Figure 7 : Variation de la dureté totale (TH) des eaux de puits (P) et de forages (F) étudiées durant la saison pluvieuse

Nitrites et nitrates

Les résultats des concentrations moyennes en nitrites (NO_2^-) des eaux étudiées durant la saison pluvieuse sont présentés à la Figure 8. Les concentrations observées dans les eaux de puits variaient entre 0,027 et 0,21 mg/L, tandis que celles des eaux de forages restaient plus faibles.

Par ailleurs, les concentrations en nitrates (NO_3^-) enregistrées dans les différents points d'eau sont présentées à la Figure 9. Les valeurs observées demeuraient inférieures à la limite de 50 mg/L admise pour l'eau potable. L'ensemble des concentrations mesurées en nitrites et nitrates restait globalement conforme à ces recommandations.

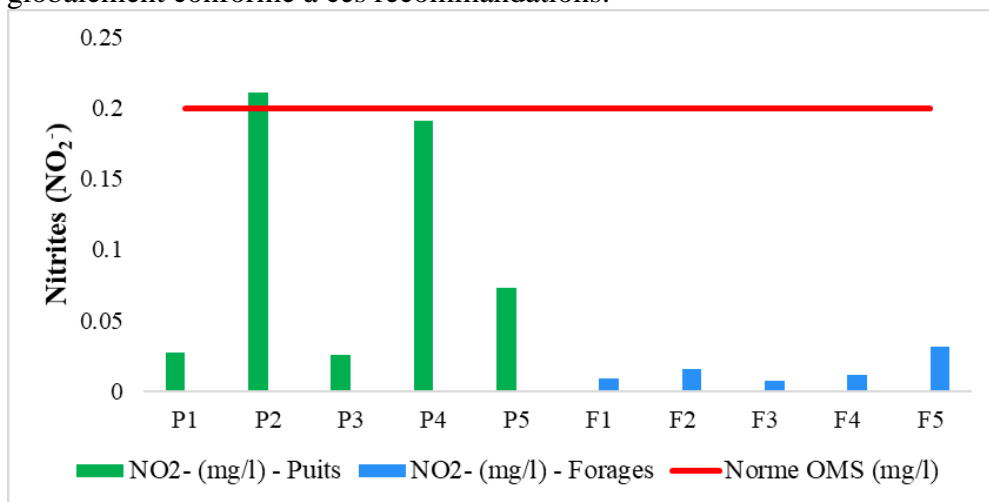


Figure 8 : Variation des nitrites (NO_2^-) des eaux de puits (P) et de forages (F) étudiées durant la saison pluvieuse

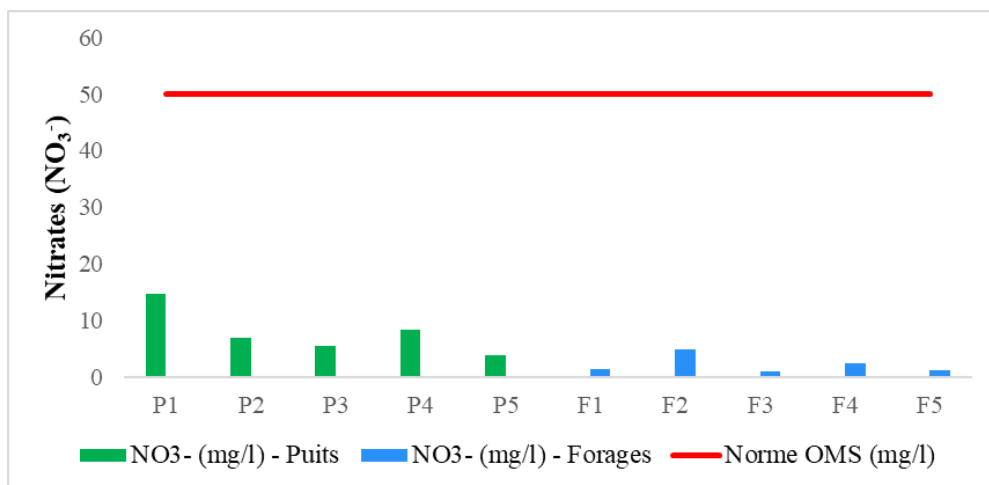


Figure 9 : Variation des nitrates (NO_3^-) des eaux de puits (P) et de forages (F) étudiées durant la saison pluvieuse

Fer total

Les concentrations moyennes en fer total mesurées dans les eaux étudiées durant la saison pluvieuse sont présentées à la Figure 10. Il ressort de ces résultats que plusieurs puits, notamment P2, P4 et P5, présentaient des concentrations en fer supérieures à la limite de 0,2 mg/L recommandée par l'OMS pour les eaux destinées à la consommation humaine.

En revanche, les concentrations observées dans les forages ainsi que dans certains puits (P1 et P3) demeuraient inférieures ou proches de cette valeur de référence.

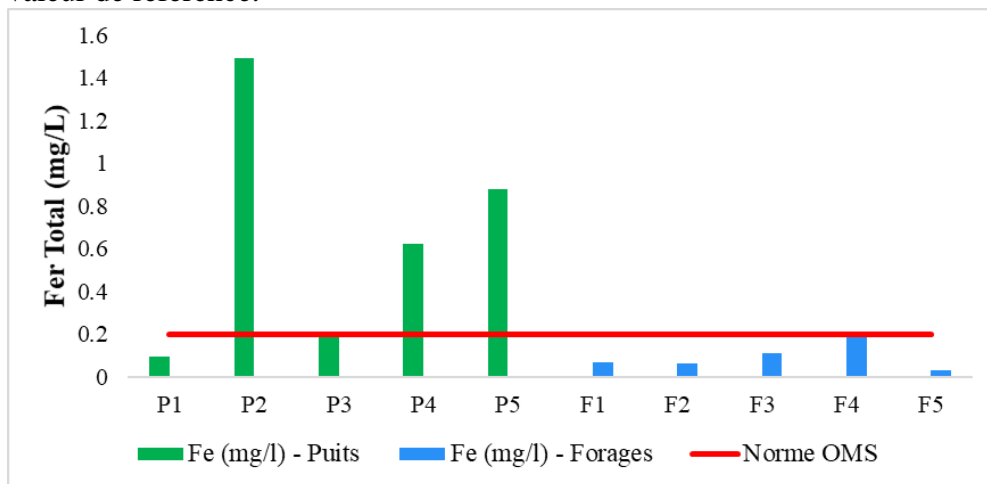


Figure 10 : Variation des concentrations en fer total des eaux de puits (P) et de forages (F) étudiées durant la saison pluvieuse

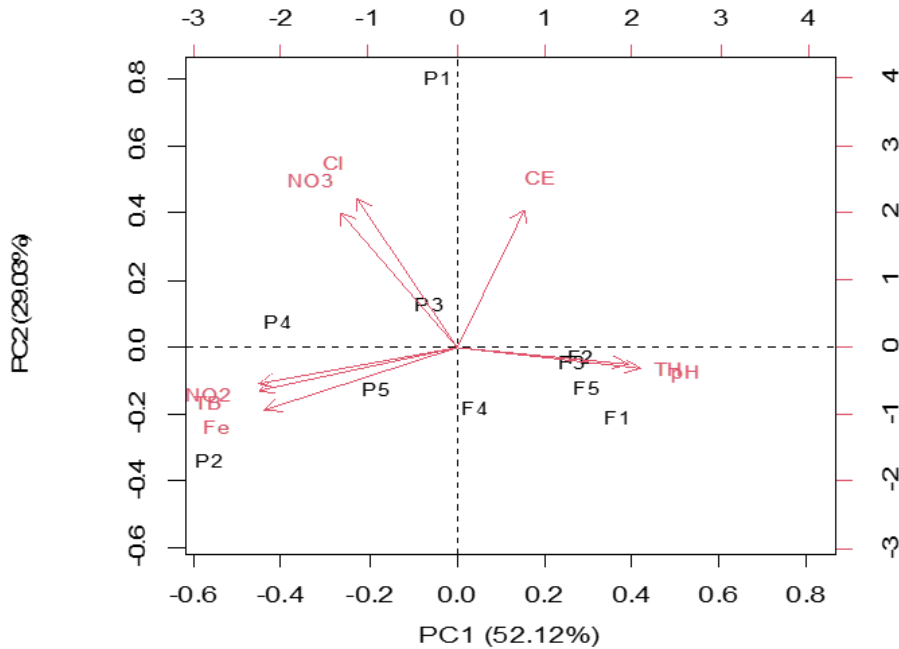
Analyse en composantes principales (ACP)

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 des eaux étudiées ainsi que les similitudes entre les eaux de puits et de forages.

Huit (8) variables physico-chimiques ont été prises en compte dans cette analyse, à savoir : le potentiel hydrogène (pH), la conductivité électrique (CE), la turbidité (TB), les nitrites (NO_2^-), les nitrates (NO_3^-), le fer total (Fe), la dureté totale (TH) et les ions chlorures (Cl^-).

Les résultats de l'ACP (Figure 11) montrent que les deux premières composantes principales expliquent 81,15 % de la variance totale des données. La première composante principale (PC1) explique 52,12 % de la variance totale tandis que la deuxième composante principale (PC2) contribue à hauteur de 29,03 %. Ces résultats traduisent une bonne représentation des données dans le plan factoriel (PC1 \times PC2).

Figure 11 : Contribution des paramètres physico-chimiques dans la qualité des eaux de puits (P) et de forages (F) étudiées



Légende : CE : conductivité électrique ; TH : dureté totale ; Fe : fer total ; Cl⁻ : ions chlorures ; NO₂⁻ : nitrites ; NO₃⁻ : nitrates ; TB : turbidité.

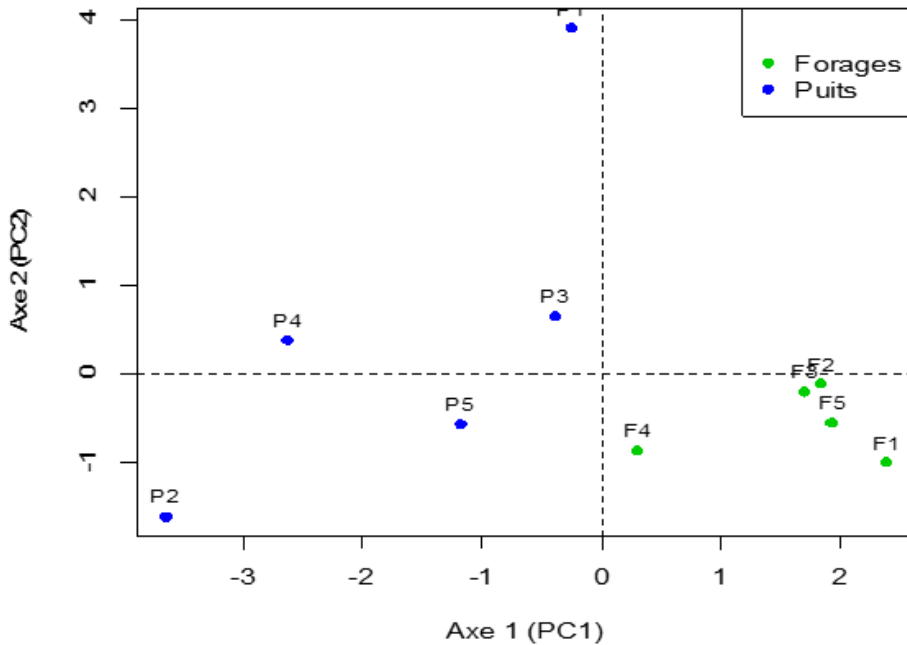
Présentation individuelle des ouvrages en composantes principales

La Figure 12 présente la projection individuelle des différents points d'eau étudiés sur le plan factoriel défini par les deux premières composantes principales (PC1 et PC2).

Les résultats montrent une séparation relativement nette entre les eaux de puits et les eaux de forages. Les forages apparaissent globalement regroupés dans le plan factoriel, traduisant une certaine homogénéité de leurs caractéristiques physico-chimiques. En revanche, les puits présentent une dispersion plus importante, indiquant une plus grande variabilité des paramètres physico-chimiques entre les différents ouvrages.

Certains puits se distinguent par leur association avec des concentrations relativement élevées en nitrites, nitrates et fer total.

Figure 12 : Projection individuelle des ouvrages étudiés sur le plan factoriel de l'Analyse en Composantes Principales (ACP)



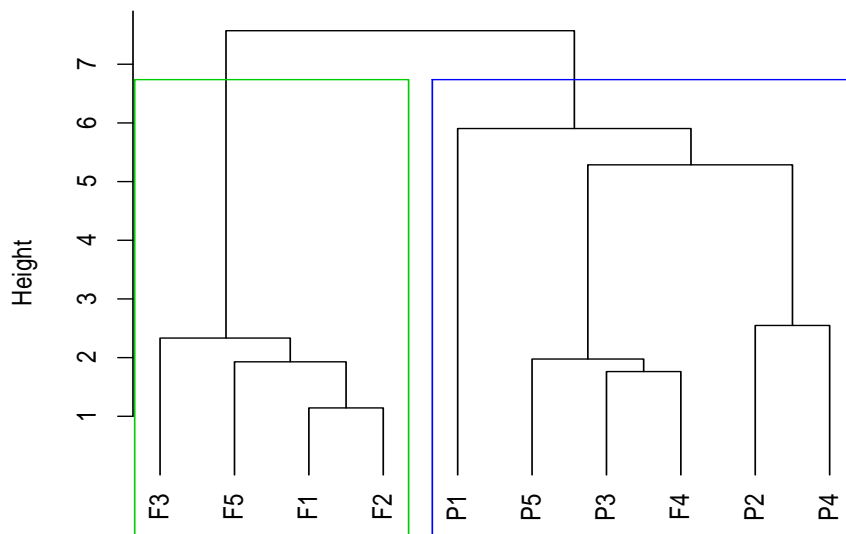
Légende : F : Forage ; P : Puits.

Classification hiérarchique ascendante et dendrogramme

Afin de compléter les résultats de l'Analyse en Composantes Principales (ACP), une Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) a été réalisée à partir des paramètres physico-chimiques étudiés. Le dendrogramme obtenu est présenté à la Figure 13.

Les résultats montrent une structuration des ouvrages en deux groupes principaux distincts. Le premier cluster regroupe majoritairement les forages, caractérisés par des eaux faiblement turbides et présentant de faibles concentrations en nitrites, nitrates et fer total. Le second cluster est principalement constitué des puits, caractérisés par des valeurs relativement élevées de turbidité, nitrites, nitrates, chlorures et fer total.

Figure 13 : Dendrogramme représentant la Classification Hiérarchique Ascendante des eaux de puits (P) et de forages (F) étudiées à partir des paramètres physico-chimiques



Légende : CE : conductivité électrique ; TB : turbidité ; TH : dureté totale ; Fe : fer total ; Cl : ions chlorures ; NO₂⁻ : nitrites ; NO₃⁻ : nitrates.

Caractérisation des clusters par les valeurs moyennes

Le Tableau 2 présente les valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques obtenues pour les deux groupes identifiés par la classification hiérarchique.

Les forages présentaient des valeurs moyennes relativement faibles de turbidité, nitrites, nitrates, chlorures et fer total, ainsi qu'un pH légèrement plus élevé. En revanche, les puits montraient des valeurs moyennes plus importantes pour plusieurs paramètres indicateurs de contamination, notamment la turbidité, les nitrites, les nitrates, les chlorures et le fer total.

Tableau 2 : Valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques des clusters obtenus par classification hiérarchique

Type	pH	CE	TB	TH	NO2	NO3	Fe	Cl
Forages	5.68666	157.193	1.85333	42.3333	0.015000	2.19333	0.092	8.84133
Puits	4.966667	164.0200	17.900000	11.13333	0.1054667	7.90000	0.658	43.09066

Discussion

Les résultats obtenus dans la présente étude mettent en évidence des différences importantes de qualité physico-chimique entre les eaux de puits et de forages utilisées pour la consommation humaine dans la commune Makiso à Kisangani durant la saison pluvieuse. Dans l'ensemble, les eaux de forages présentent une qualité physico-chimique relativement meilleure que celle des puits, bien que certaines anomalies aient également été observées dans quelques ouvrages.

Les températures relativement stables observées dans les différents points d'eau sont caractéristiques des eaux souterraines en milieu tropical humide comme celui de Kisangani. Des résultats similaires ont été rapportés dans plusieurs études réalisées en Afrique subsaharienne, notamment par Ahoussi et *al.* (2018) en Côte d'Ivoire et par Mutonkole et *al.* (2025) en République Démocratique du Congo. Ces observations sont également cohérentes avec les indications de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS, 2017) concernant les eaux souterraines en milieu tropical. Les valeurs enregistrées, légèrement supérieures à la valeur indicative de 25 °C recommandée pour le confort de consommation, peuvent être liées aux conditions climatiques locales de la ville de Kisangani, caractérisée par des températures ambiantes élevées durant une grande partie de l'année.

Les résultats du potentiel hydrogène (pH) révèlent un caractère globalement acide des eaux de puits et de forages étudiées. Les valeurs observées (4,9 - 6,13) demeurent inférieures aux normes de potabilité recommandées par l'OMS (2011), comprises entre 6,5 et 8,5. Cette acidité pourrait être associée à la nature géochimique des sols tropicaux, au lessivage des matières organiques ainsi qu'aux fortes précipitations favorisant l'infiltration des eaux acides dans les nappes superficielles. Des observations similaires ont été rapportées dans plusieurs études menées en République Démocratique du Congo et dans d'autres régions tropicales africaines (Ahoussi et *al.*, 2018 ; Assi, 2020). Ces résultats rejoignent notamment ceux de Nzomba (2023), qui a également mis en évidence un caractère acide de plusieurs eaux souterraines urbaines dans la ville de Kinshasa. Un pH faible peut également favoriser la dissolution du fer dans les eaux souterraines, ce qui expliquerait certaines concentrations élevées observées dans plusieurs puits (P2, P4 et P5).

Les faibles valeurs de conductivité électrique (79,9–285,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$) enregistrées traduisent une faible à moyenne minéralisation des eaux souterraines étudiées. Les concentrations relativement faibles en nitrates et en ions chlorures suggèrent une influence limitée des principales sources de pollution anthropique. Des résultats comparables ont été obtenus par Ako et *al.* (2011) au Cameroun ainsi que par Ahoussi et *al.* (2018) en Côte d'Ivoire. Une faible minéralisation des eaux souterraines a également été rapportée récemment par Anongba Braphond et *al.* (2023), qui l'ont associée à la nature géologique des aquifères et aux processus de minéralisation naturelle des eaux souterraines. Toutefois, les concentrations légèrement plus élevées observées dans certains puits pourraient être liées à l'infiltration des eaux de ruissellement et aux activités humaines exercées à proximité des points d'eau.

Les résultats de la turbidité montrent une différence nette entre les puits (2,3–38,7 NTU) et les forages (1,1–3,13 NTU). Les puits présentent des valeurs de turbidité nettement plus élevées, parfois largement supérieures à la

limite de 5 NTU recommandée pour les eaux destinées à la consommation humaine. Cette situation pourrait s'expliquer par les pratiques de puisage, la faible profondeur des ouvrages ainsi que la remise en suspension des particules lors du puisage ou du prélèvement de l'eau. La faible turbidité observée dans les forages suggère une meilleure protection naturelle contre les apports directs de matières en suspension. Selon Nawaz et *al.* (2023) et Testa et *al.* (2022), des niveaux élevés de turbidité peuvent réduire l'efficacité des procédés de désinfection et favoriser la survie des micro-organismes pathogènes dans l'eau.

La dureté totale des eaux de puits et de forages étudiées reste globalement faible (6–57,33 mg/L), traduisant un caractère très doux des eaux souterraines de Makiso. Ces faibles teneurs en calcium et en magnésium pourraient être liées à la nature géologique locale ainsi qu'à une faible minéralisation des aquifères traversés. Des résultats similaires ont également été rapportés par Saana et *al.* (2016) dans des environnements tropicaux comparables.

Les concentrations en nitrites observées dans certains puits pourraient traduire une influence anthropique liée aux infiltrations d'eaux usées, au ruissellement des eaux de surface ou à la proximité des latrines. Bien que les valeurs enregistrées restent globalement conformes aux recommandations de l'OMS, leur présence suggère une certaine vulnérabilité des nappes superficielles aux contaminations diffuses. Les nitrates présentent quant à eux des concentrations relativement faibles, suggérant une contamination azotée modérée des eaux étudiées.

Les teneurs élevées en fer observées dans certains puits (P2 = 1,49 mg/L ; P4 = 0,62 mg/L ; et P5 = 0,87 mg/L) pourraient être liées aux conditions géochimiques locales ainsi qu'au caractère acide des eaux, qui favorise la dissolution des minéraux ferrugineux présents dans les sols et les formations géologiques. Des observations similaires ont été rapportées dans plusieurs études menées en République Démocratique du Congo (Kyowire Kambali et *al.*, 2016 ; Nzomba, 2023 ; Mutonkole et *al.*, 2025). Bien que le fer ne constitue pas nécessairement un risque toxique majeur aux concentrations observées, des teneurs élevées peuvent altérer les caractéristiques organoleptiques de l'eau et favoriser certains développements microbiens (Gouvernement du Québec, 2016).

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) a permis de mieux comprendre les relations entre les différents paramètres physico-chimiques étudiés. Les deux premières composantes principales expliquent 81,15 % de la variance totale des données, traduisant une bonne représentation statistique des relations entre les variables. L'ACP met en évidence une opposition entre les paramètres liés à la minéralisation naturelle des eaux (CE, pH, TH) et ceux associés aux phénomènes de contamination (TB, NO₂⁻, Fe). Les eaux de

forages apparaissent principalement influencées par les processus naturels d'interaction eau-roche, tandis que les puits semblent davantage soumis aux contaminations de surface et aux influences anthropiques.

La Classification Hiérarchique Ascendante confirme ces résultats en distinguant deux groupes principaux correspondant globalement aux puits et aux forages. Les forages présentent une qualité physico-chimique relativement homogène et stable, alors que les puits se caractérisent par une plus forte variabilité et des concentrations plus élevées en paramètres indicateurs de contamination. Ces observations traduisent une vulnérabilité plus importante des puits aux infiltrations superficielles, au ruissellement et aux activités humaines environnantes.

Dans l'ensemble, les résultats obtenus montrent que les eaux de puits de la commune Makiso apparaissent plus exposées aux phénomènes de contamination que les eaux de forages. Cette situation souligne l'importance du renforcement des mesures de protection sanitaire autour des ouvrages hydrauliques, du suivi régulier de la qualité des eaux ainsi que de l'amélioration des conditions d'assainissement afin de réduire les risques de dégradation des ressources en eau souterraine utilisées par les populations locales.

Cette étude présente certaines limites qui doivent être prises en considération lors de l'interprétation des résultats. Le nombre relativement limité de points d'eau étudiés ainsi que la période d'échantillonnage restreinte à la saison pluvieuse peuvent limiter la généralisation des résultats à l'ensemble de la commune Makiso. Par ailleurs, seuls certains paramètres physico-chimiques ont été analysés. Malgré ces limites, les résultats obtenus fournissent des informations utiles sur la qualité des eaux souterraines utilisées pour la consommation humaine dans la zone d'étude.

Conclusion et suggestions

Cette étude a permis d'évaluer les caractéristiques physico-chimiques des eaux de puits et de forages utilisées pour la consommation humaine dans la commune Makiso à Kisangani durant la saison pluvieuse. Les résultats obtenus montrent que la qualité de ces eaux varie selon le type d'ouvrage et les conditions environnementales locales. Les eaux de forages présentent globalement des caractéristiques plus favorables, tandis que certains puits apparaissent plus vulnérables aux influences extérieures susceptibles d'altérer leur qualité.

Les analyses statistiques multivariées ont confirmé l'existence d'une différenciation entre les deux types d'ouvrages, mettant en évidence l'importance des facteurs environnementaux et des conditions de protection des points d'eau. Ces observations soulignent la nécessité d'un suivi régulier de la qualité des eaux souterraines utilisées par les populations.

Afin de réduire les risques liés à la dégradation de la qualité de l'eau, il apparaît nécessaire de renforcer la protection des ouvrages, d'améliorer les conditions d'assainissement à proximité des points d'eau et de promouvoir les bonnes pratiques d'hygiène auprès des usagers. Par ailleurs, des investigations complémentaires intégrant d'autres paramètres de pollution ainsi qu'un suivi sur plusieurs saisons permettraient d'approfondir la compréhension des mécanismes influençant la qualité des eaux souterraines dans la commune Makiso.

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. AQUAREF. (2011). *Guide des prescriptions techniques pour la surveillance physico-chimique des milieux aquatiques*. [https://www.aquaref.fr/sites/default/files/Prescriptions techniques V F.pdf](https://www.aquaref.fr/sites/default/files/Prescriptions%20techniques%20V%20F.pdf)
3. Ahoussi, E. K., Keumean, N. K., Kouassi, M. A., & Koffi, B. Y. (2018). Étude 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>
4. 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>

5. 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://eujournal.org/index.php/esj/article/view/17217>
6. Assi, C.M.M.F., & Dibi, B. (2020). Origine de l'acidité des eaux souterraines en Côte d'Ivoire. <https://hdl.handle.net/20.500.12177/9587>
7. Bennasser, L. (1997). *Diagnostic de l'état de l'environnement dans la plaine du Gharb* (Thèse de doctorat).
8. Food and Agriculture Organization (FAO). (2026). *L'agriculture et l'environnement*. Consulté le 19 avril 2026, sur <https://www.fao.org/4/y3557f/y3557f11.htm>
9. Gouvernement du Québec. (2016). *Effets sur la santé des contaminants de l'eau potable : Fer*. <https://www.quebec.ca/agriculture-environnement-et-ressources-naturelles/eau-potable/qualite-eau-potable/contaminants/effets-sante-contaminants/fer>
10. Hane, M., Diagne, I., Ndiaye, M., Ndiaye, B., Dione, C. T., Cissé, D., & Diop, A. (2020). Étude comparative de la qualité physico-chimique des eaux de puits et forages consommées au Sénégal. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v14i9.34>
11. Kahoul, M., Derbal, N., Alioua, A., & Ayad, W. (2014). Évaluation de la qualité physico-chimique des eaux de puits dans la région de Berrahal (Algérie). <http://archives.univ-biskra.dz/handle/123456789/2897>
12. 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>
13. McKinney, M. L. (2002). Urbanization, biodiversity, and conservation. *BioScience*, 52(10), 883–890. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2002\)052\[0883:UBAC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2002)052[0883:UBAC]2.0.CO;2)
14. Mutonkole Ngoie, L., Nokewa Sama, B., Mulunda Nkulu, J., Bukonda Bwakamana, P., Tshibangu Mutshi, P., Samba Kabayo, F., & Lukumwena Kalala, Z. (2025). Analyse physico-chimique de l'eau de puits de la ville de Kolwezi. *American Journal of Innovative Research*

- and Applied Sciences*, 20(5), 63–72.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.15466661>
15. Tchoumou, M., Louzayadio Mvouezolo, R. F., Malera Kombo, M. A., Moussoki Nsona, P., & Ouamba, J. M. (2023). Évaluation de la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux de puits à Brazzaville. *ESI Preprints*. <https://doi.org/10.19044/esipreprint.9.2023.p588>
 16. Nawaz, R., Nasim, I., Irfan, A., Islam, A., Naeem, A., Ghani, N., Irshad, M. A., Latif, M., Nisa, B. U., & Ullah, R. (2023). Water Quality Index and Human Health Risk Assessment of Drinking Water in Selected Urban Areas of a Mega City. *Toxics*, 11(7), 577. <https://doi.org/10.3390/toxics11070577>
 17. Nzomba, D. (2023). Hydrogéochimie et contamination des eaux souterraines de la partie urbaine du bassin versant de la N'djili à Kinshasa. *Afrique Science*, 22(4), 30–46. <https://www.afriquescience.net/admin/postpdfs/526b8592e834fcaacc26a22965ea2b1713548740.pdf>
 18. Organisation mondiale de la Santé (OMS). (2011). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed.). World Health Organization.
 19. Organisation mondiale de la Santé (OMS). (2017). *Guidelines for drinking-water quality* (4th ed., incorporating the first addendum). World Health Organization.
 20. Organisation mondiale de la Santé (OMS). (2023). *Eau potable*. <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
 21. Rodier, J., Legube, B., Merlet, N., & Brunet, R. (2009). *L'analyse de l'eau* (9e éd.). Paris : Dunod.
 22. Saana, S.B.B.M., Fosu, S.A., Sebiawu, G.E. et al. Assessment of the quality of groundwater for drinking purposes in the Upper West and Northern regions of Ghana. *SpringerPlus* 5, 2001 (2016). <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3676-1>
 23. Testa, G., Persichetti, G., & Bernini, R. (2022). Optical spectroscopy for on line water monitoring. Dans A. Di Mauro, A. Scozzari, & F. Soldovieri (Éds.), *Instrumentation and measurement technologies for water cycle management* (pp. 165–188). Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-08262-7_8
 24. 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>
 25. Yéo, K. M., Koffi, K. J. T., Kouadio, A. N. B., & Goné, D. L. (2023). Physico-chemical quality of well and borehole water consumed in the commune of Bingerville (Ivory Coast). *Journal of Chemical, Biological and Physical Sciences*, 13(4), 521–530. <https://doi.org/10.24214/jcbps.D.13.4.52130>