

Étude comparative saisonnière de la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux de puits et de forages de Makiso (Kisangani, RDC)

Moussa Issoufou Djibo

Mastéran, 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

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

Jacqueline Makatiani

Docteur en Thèse Moi Université, 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

Approved: 08 May 2026

Posted: 10 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). *Étude comparative saisonnière de la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux de puits et de forages de Makiso (Kisangani, RDC)*. ESI Preprints. <https://doi.org/10.19044/esipreprint.5.2026.p424>

Résumé

Le présent travail est une étude de comparaison de la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux de puits et forages utilisés pour la consommation dans la commune de Makiso (Kisangani, R.D.C) en tenant compte des variations saisonnières (saison pluvieuse et saison sèche). Des

prélèvements d'eau ont été effectués en différents points de captage et analysés suivant les méthodes classiques recommandées. Les résultats ont été comparés aux normes de potabilité. Les mesures physico-chimiques font apparaître une température relativement stable (26,2–28,0 °C), une conductivité modérée et des concentrations en nitrates, nitrites et ions chlorures conformes aux normes internationales. En revanche, les eaux sont généralement acides (pH = 4,9 – 6,8), la teneur en fer est élevée dans certains puits et la turbidité est trop forte, surtout pendant la saison des pluies. Du point de vue microbiologique, les résultats montrent une contamination importante marquée par la présence de coliformes totaux, de coliformes fécaux, de streptocoques fécaux et, dans certains cas, d'Escherichia coli et de bactéries du groupe Salmonella/Shigella. Les résultats montrent que les eaux ne sont pas conformes aux normes de potabilité de manière généralisée. Les analyses statistiques (ACP, classification hiérarchique et corrélation de Pearson) indiquent une différenciation nette entre les eaux de puits et de forages, les premières étant plus vulnérables à la contamination.

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

Comparative Study of Physicochemical and Microbiological Quality of Well and Borehole Water in Makiso (Kisangani, DRC) During Rainy and Dry Seasons

Moussa Issoufou Djibo

Mastéran, 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

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

Jacqueline Makatiani

Docteur en Thèse Moi Université, Kenya

Benjamin Dowiya Nzawele

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

Abstract

The present work is a comparison study of the physicochemical and microbiological quality of water from wells and boreholes used for consumption in the commune of Makiso (Kisangani, DRC) taking into account seasonal variations (rainy season and dry season). Water samples were taken from different catchment points and analyzed using standard recommended methods. The results were compared to World Health Organization drinking standards. Physico-chemical measurements show a relatively stable temperature (26.2–28.0 °C), moderate conductivity and concentrations of nitrates, nitrites and chlorides in compliance with international standards. On the other hand, the waters are generally acidic (pH = 4.9 – 6.8), the iron content is high in certain wells and the turbidity is too high, especially during the rainy season. From a microbiological point of view, the results show significant contamination marked by the presence of total coliforms, fecal coliforms, fecal streptococci and, in certain cases, *Escherichia coli* and bacteria from the *Salmonella/Shigella* group. The results

show that the water does not generally comply with drinking standards. Statistical analyzes (PCA, hierarchical classification and Pearson correlation) indicate a clear differentiation between well and borehole water, the former being more vulnerable to contamination.

Keywords: Water quality; Groundwater; Well; Drilling; Microbiological contamination; Physico-chemical parameters; Seasons; 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). Il doit avoir une très bonne qualité physico-chimique, chimique et microbiologique pour être utilisé 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'Energie 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.

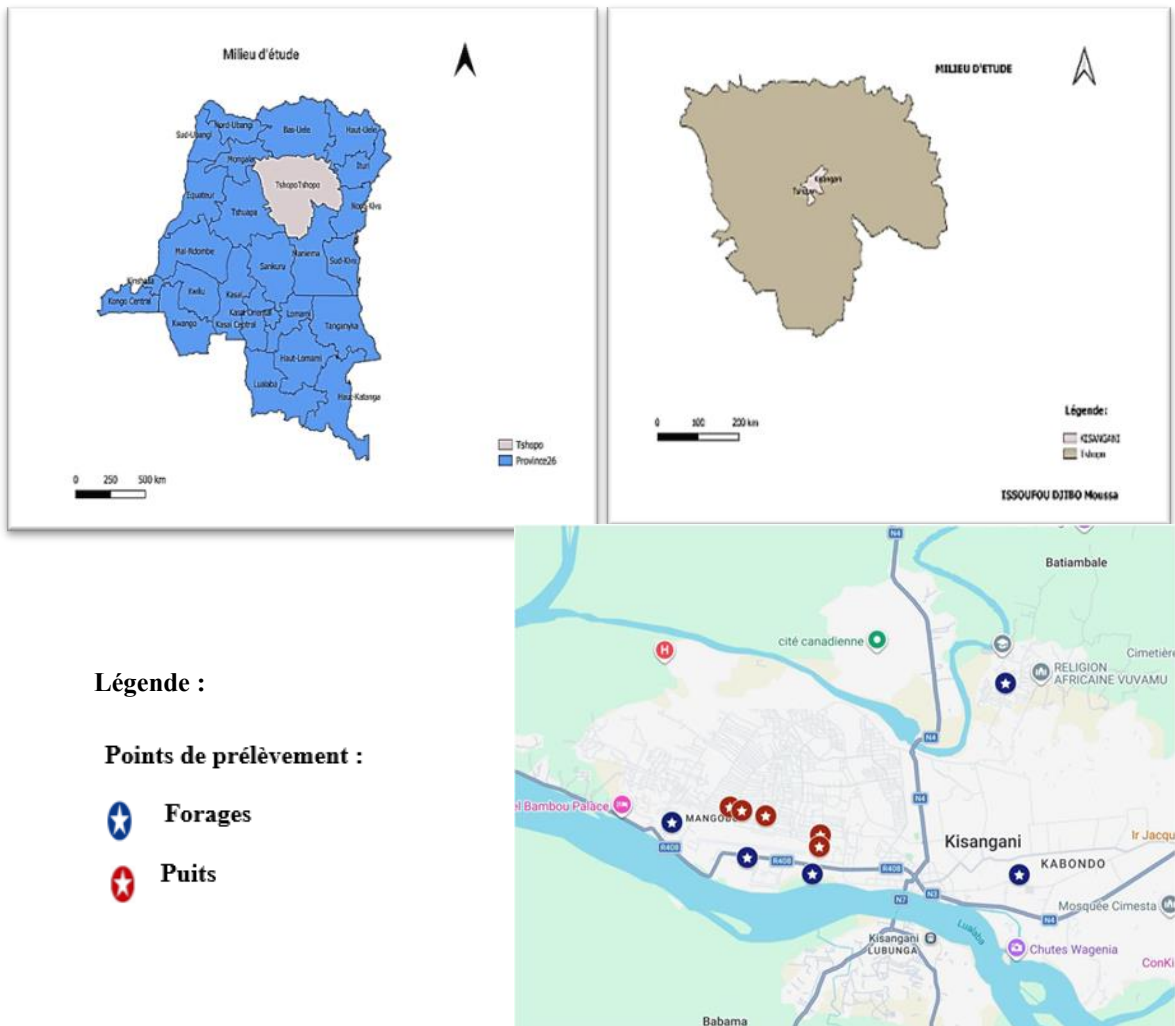
À Kisangani, ville entourée de nombreux cours d'eau, ces eaux disponibles présentent généralement des caractéristiques organoleptiques acceptables (en termes de couleur, de goût et d'odeur). Cependant, dans de nombreuses communes, l'accès à l'eau potable reste limité, du fait du peu de points d'approvisionnement 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).



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 ont été collectés dans des flacons de 300 ml stérile et des bouteilles en polyéthylène de 750 ml, tôt le matin (entre 7 heures à 14 heures, GMT+2) pour limiter l'influence des variations journalières. Ils sont conservés dans une glacière contenant de glaçon à 4 °C jusqu'au laboratoire de la REGIDESO et de la faculté de sciences UNIKIS pour être analysés (Rodier et al 2009). Au total dix (10) ouvrages ont été échantillonnés dont cinq (5) puits et cinq (5) forages réparties dans différents quartiers de la commune Makiso en tenant compte de leurs accessibilités, de la densité de population, et de fréquences d'utilisation. Trois (3) campagnes ont été réalisées en novembre 2025 (saison pluvieuse) et en février 2026 (saison sèche) (Figures 2, 3, 4).

Au cours de ces campagnes, des paramètres physico-chimiques de eaux ont été mesurés sur le champ (Température, potentiel d'hydrogène (pH) et la conductivité électrique) à l'aide d'un multi paramètre hach DR1900 et SL1000. En laboratoire des paramètres chimiques ont été déterminées comme le ions chlorures, la dureté totale par dosages ; les nitrates, les nitrites, le fer total par la méthode spectrophotométrique et la turbidité par néphélométrie. Pour le cas des analyses de paramètres microbiologiques deux types de méthodes différents ont été utilisés : la méthode d'ensemencement enrobages (pour la détermination de coliformes totaux, E. Coli, Salmonella Shigella (pré enrichir dans Bouillon de Hauff Man), et les germes totaux) (ISO 8199, 1988) et la méthode technique générale des dilutions en milieu liquide (pour Streptococcus fécaux et coliformes fécaux) (University of Batna 2, 2026).

Tableau 1 : coordonnées des points d'eaux (Puits et Forages) échantillonnées dans la commune Makiso, Kisangani

| N° | Nom du points | 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 |



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 données collecter ont été soumise au analyses statistiques comme : la statistique descriptive, le teste Student, les analyses en Composantes Principales (ACP) et les analyses hiérarchiques ascendantes à l'aide de moyennes Euclidiennes à travers les logiciel R (4.3.3) et Excel (2016). L'analyse en composantes principales (ACP), beaucoup utiliser pour interpréter les données hydro-chimiques (Bennasser, 1997) a été appliqué dans ce travail présent, afin de mieux comprendre les relations entre les paramètres physico-chimiques et d'identifier les similitudes entre les eaux de puits et forages. Pour traiter ces données, huit (9) variables ont été utilisés à savoir : la Température, le pH, la conductivité électrique (CE), la turbidité, les ions (NO_2^- , NO_3^- , Fe, TH et 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 2).

Tableau 2: Valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques des eaux (puits et forages) de Makiso (Kisangani, RDC) en saison pluvieuse et sèche, comparées aux normes de l'OMS

| Paramètre | Unité | Saison pluvieuse (Min–Max) | Saison sèche (Min–Max) | Normes OMS | Conformité |
|--|-------|----------------------------|------------------------|------------|-------------------------------|
| Température | °C | 26,2 – 27,1 | 27,0 – 28,0 | 25 °C | Non Conforme |
| pH | - | 4,9 – 6,1 | 4,9 – 6,8 | 6,5 – 8,5 | Non conforme |
| Conductivité (CE) | μS/cm | 79,9 – 285,9 | 68,7 – 381,9 | ≤ 1000 | Conforme |
| Turbidité (TB) | NTU | 1,1 – 38,7 | 1,5 – 41,7 | ≤ 5 | Non conforme (puits) |
| Dureté totale (TH) | mg/L | 6,0 – 64,7 | 1,7 – 18,5 | ≤ 100* | Conforme |
| Nitrates (NO ₃ ⁻) | mg/L | 1,1 – 14,8 | 1,1 – 15,1 | ≤ 50 | Conforme |
| Nitrites (NO ₂ ⁻) | mg/L | 0,008 – 0,211 | 0,006 – 0,433 | ≤ 3 | Conforme |
| Fer total (Fe) | mg/L | 0,03 – 1,49 | 0,02 – 1,00 | ≤ 0,2 | Non conforme (certains puits) |
| Chlorures (Cl ⁻) | mg/L | 0,5 – 83,4 | 7,6 – 94,7 | ≤ 250 | Conforme |

Température

Les résultats de la Figure 2 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. Les valeurs sont relativement homogènes entre les différents points de prélèvement, traduisant la stabilité thermique caractéristique des eaux souterraines en milieu tropical (Figure 5).

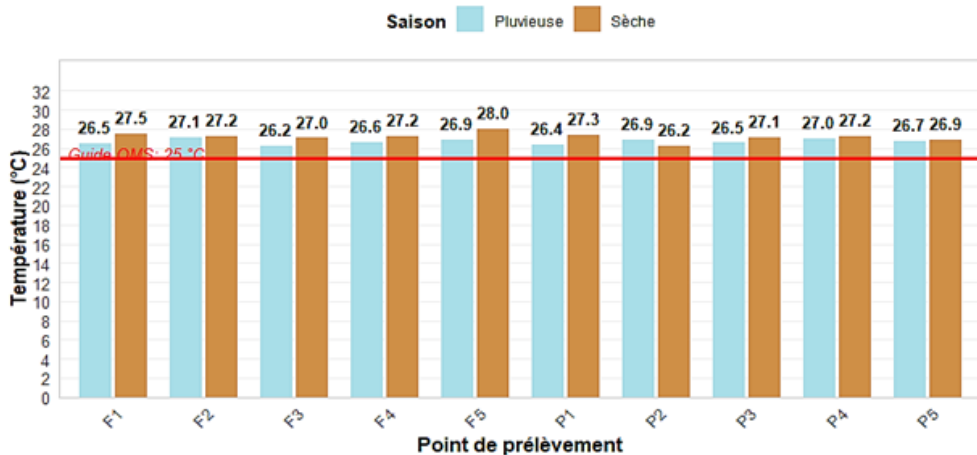


Figure 5: Variation saisonnière de la température des eaux de puits et de forages dans la commune de Makiso

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.

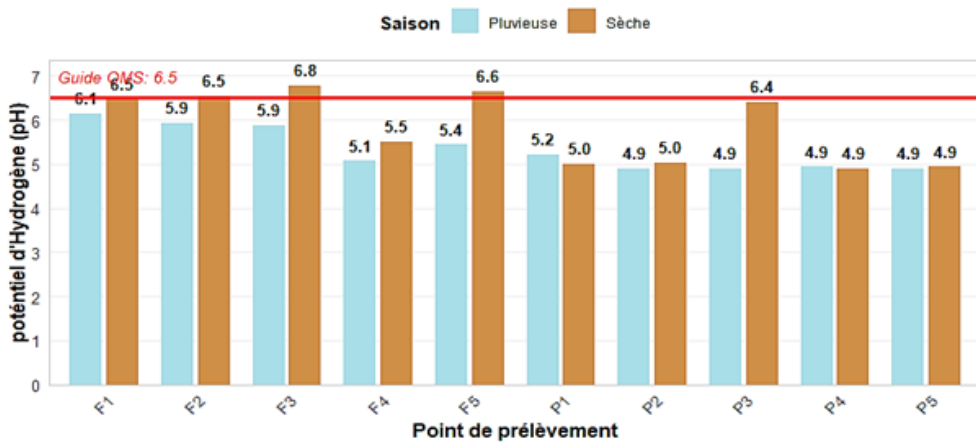


Figure 6 : Variation du pH des eaux de puits et de forages comparée aux normes de l’OMS

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).

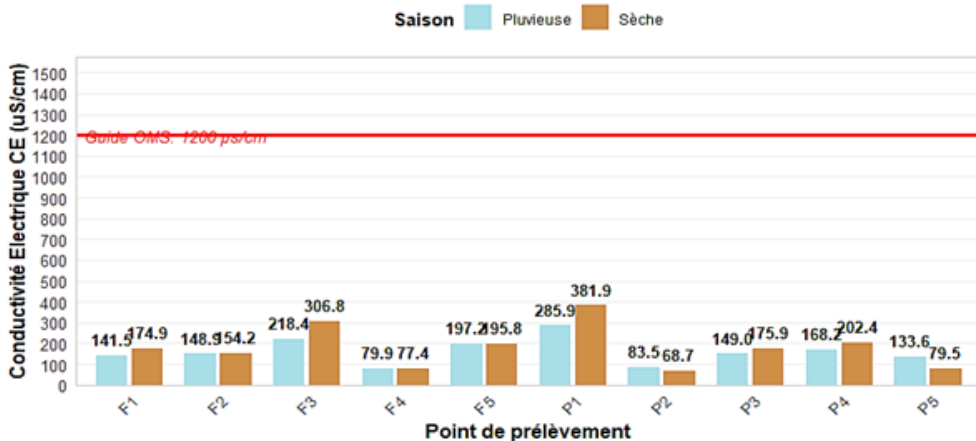


Figure 7 : Distribution de la conductivité électrique (CE) des eaux de puits et de forages selon les saisons

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).

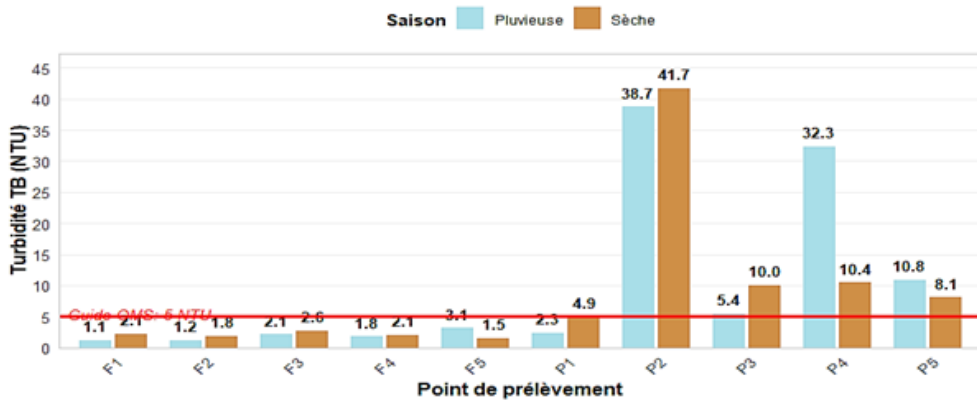


Figure 8 : Variation de la turbidité (TB) des eaux de puits et de forages et comparaison avec la valeur guide de l’OMS

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).

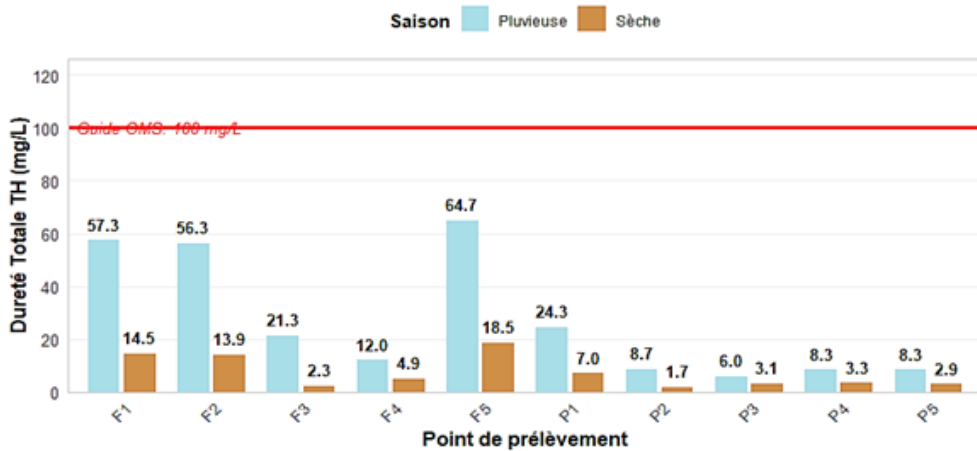


Figure 9 : Répartition de la dureté totale (TH) des eaux de puits et de forages

Nitrates (NO₃⁻) et Nitrites (NO₂⁻)

Les concentrations de **nitrates** (NO₃⁻) et de **nitrites** (NO₂⁻) demeurent basses et inférieures aux seuils recommandés pour l’eau potable (Figures 10 et 11).

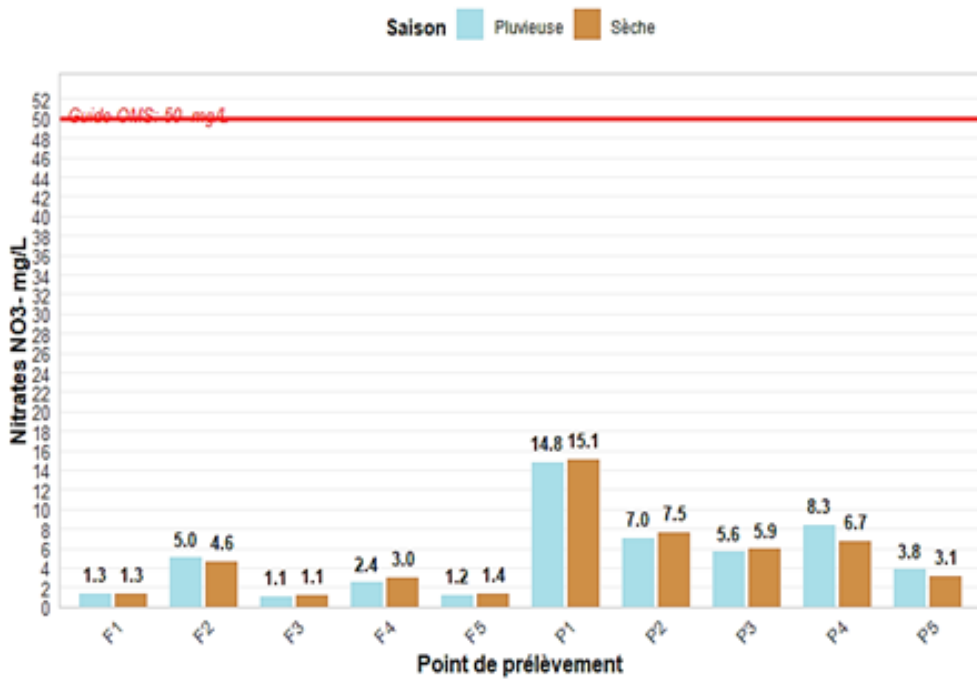


Figure 10 : Concentrations en nitrates (NO₃⁻) dans les eaux de puits et de forages

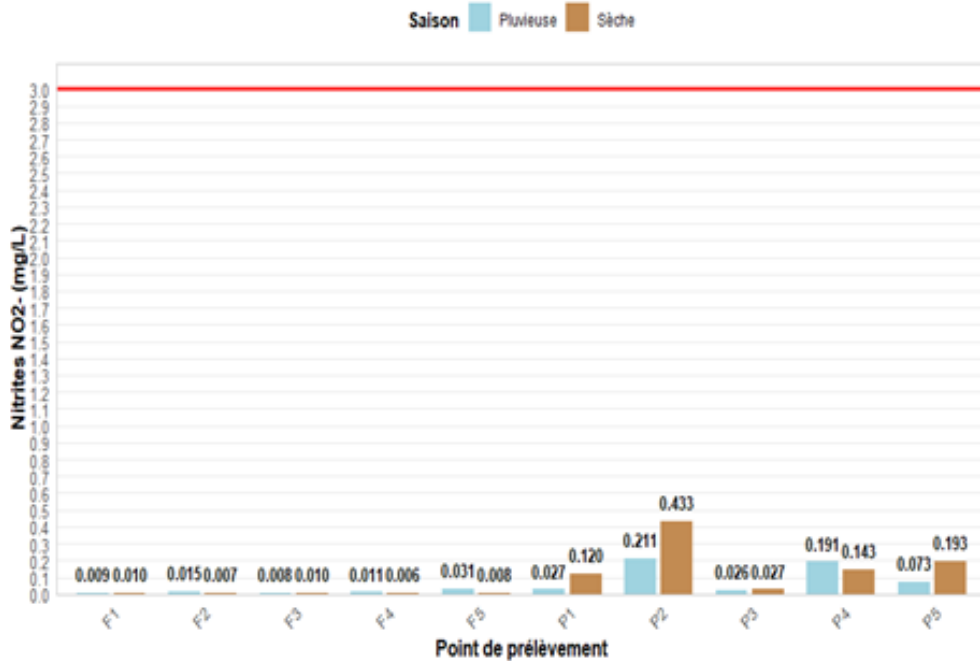


Figure 11 : Concentrations en nitrites (NO₂⁻) dans les eaux de puits et de forages

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).

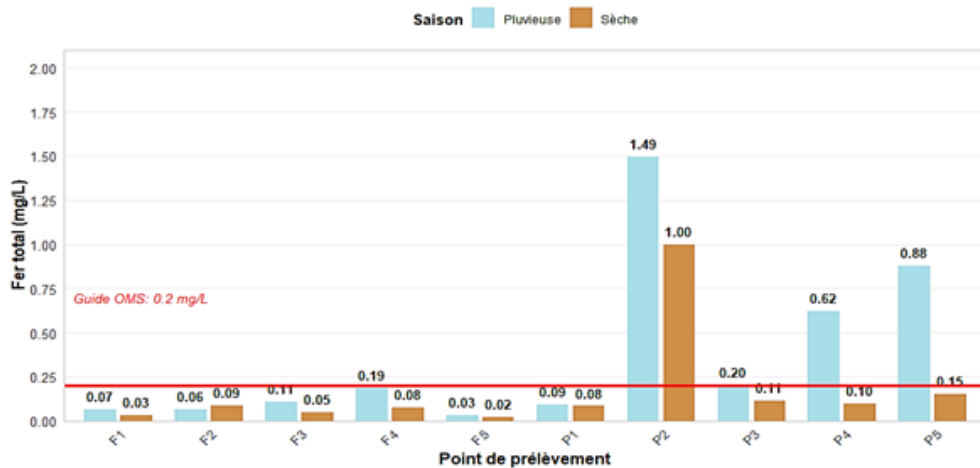


Figure 12 : Distribution du fer total (Fe) dans les eaux de puits et de forages

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).

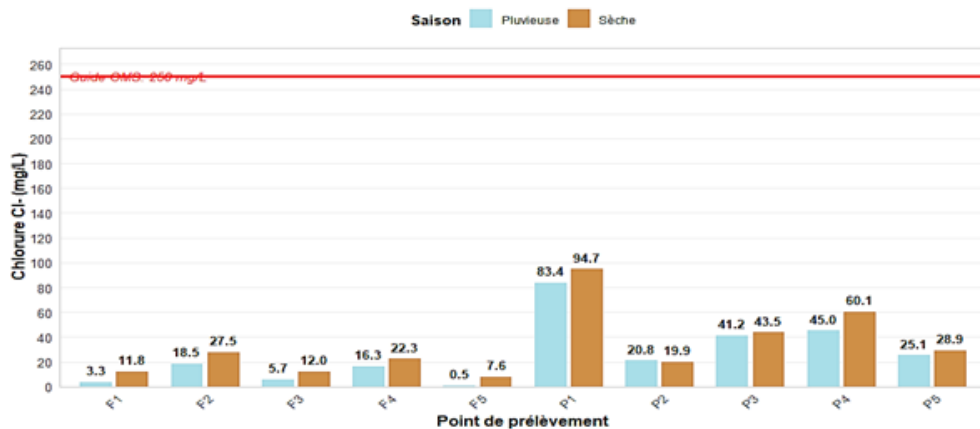


Figure 13 : Concentrations en chlorures (Cl⁻) dans les eaux de puits et de forages

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 présence d'acides humiques dans les sols tropicaux de Kisangani.

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 sont 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 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 3).

Tableau 3 : Résultats des analyses microbiologiques des eaux de puits et de forages à Makiso en saison pluvieuse et sèche

| Paramètre | Unité | Saison pluvieuse (Min–Max) | Saison sèche (Min–Max) | Normes OMS | Conformité |
|---------------------------|------------|----------------------------|------------------------|------------|-------------------|
| Germes totaux (GT) | UFC/100 mL | 3 667 – 21 633 | 2 267 – 12 400 | 0 | Non conforme |
| Coliformes totaux (CT) | UFC/100 mL | 67 – 7 533 | 333 – 7 200 | 0 | Non conforme |
| Escherichia coli | UFC/100 mL | 0 | 0 – 33 | 0 | Non conforme (P2) |
| Coliformes fécaux (CF) | UFC/100 mL | 33 – 567 | 0 – 476 NPP/100 mL | 0 | Non conforme |
| Streptocoques fécaux (SF) | UFC/100 mL | 0 | 35 – 440 NPP/100 mL | 0 | Non conforme |
| Salmonella/Shigella (SS) | UFC/100 mL | 0 – 500 | 0 – 500 | 0 | Non conforme |

Germes totaux

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

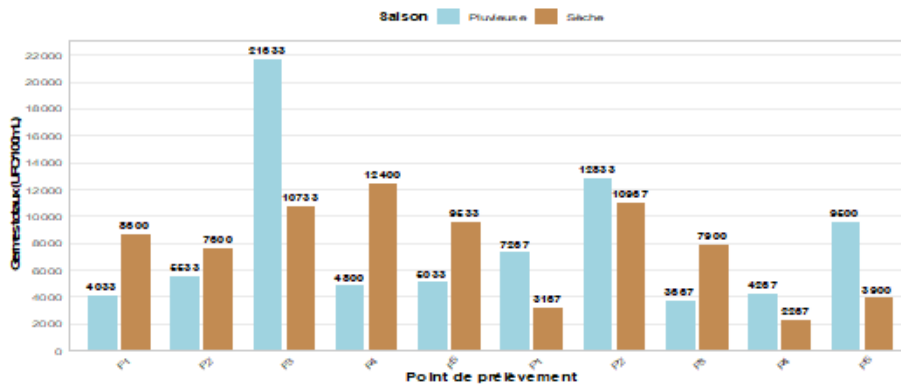


Figure 14 : Répartition des germes totaux dans les eaux de puits et de forages

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).

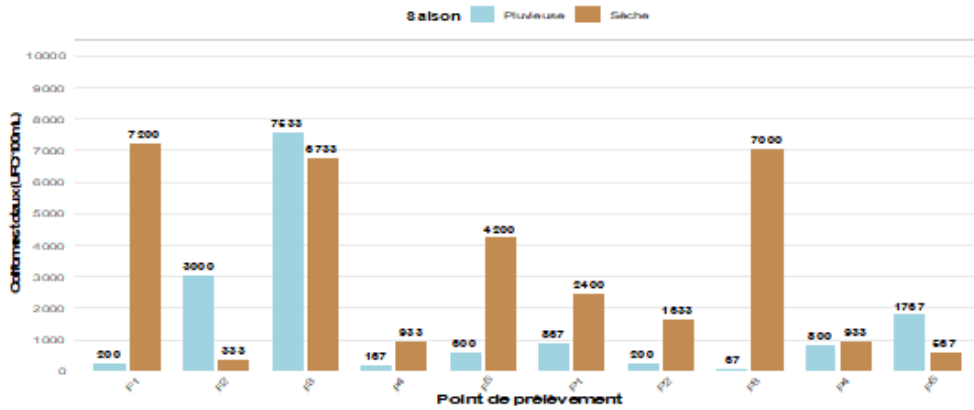


Figure 15 : Distribution des coliformes totaux selon les points de prélèvement et les saisons

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).

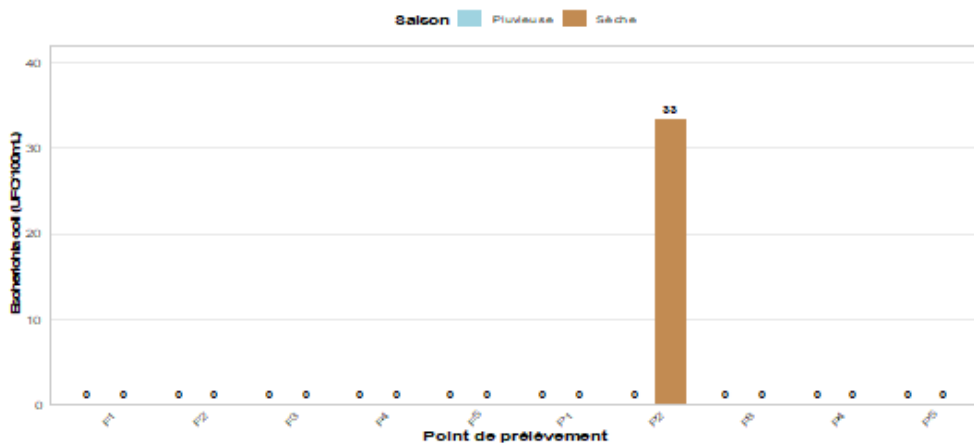


Figure 16 : Présence d'Escherichia coli dans les eaux étudiées

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).

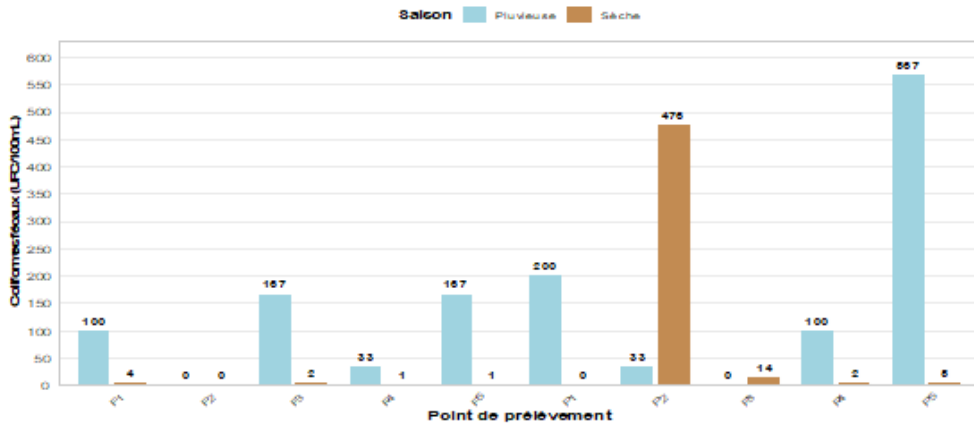


Figure 17 : Variation des coliformes fécaux dans les eaux de puits et de forages

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).

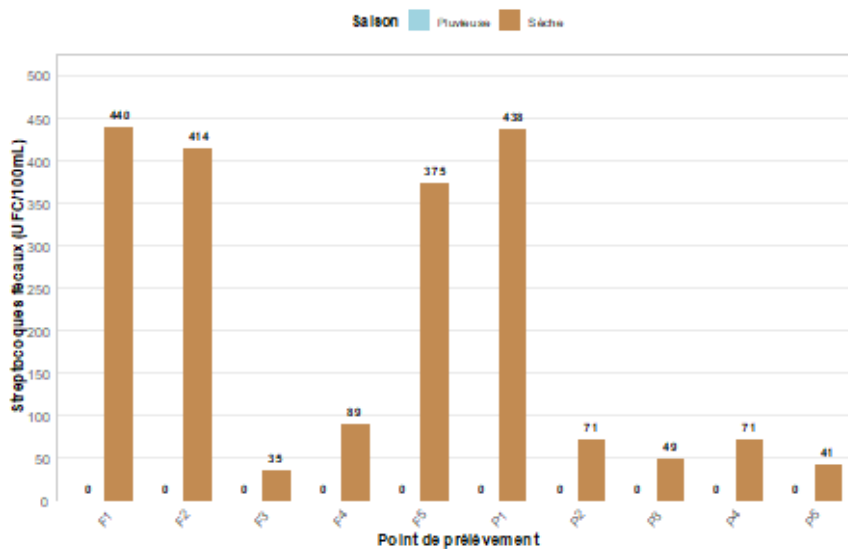


Figure 18 : Distribution des streptocoques fécaux dans les eaux étudiées

Salmonella/Shigella (SS)

La présence de bactéries du groupe **Salmonella/Shigella** 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).

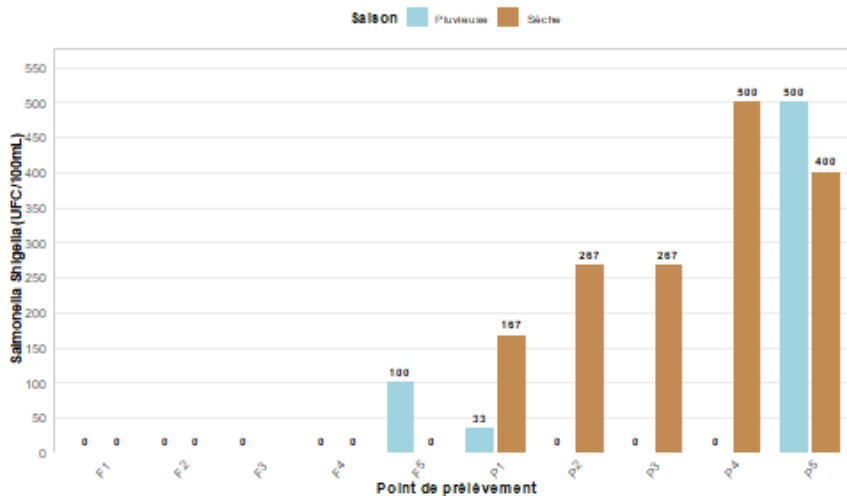


Figure 19 : Présence de Salmonella et Shigella dans les eaux de puits et de forages

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/Shigella 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).

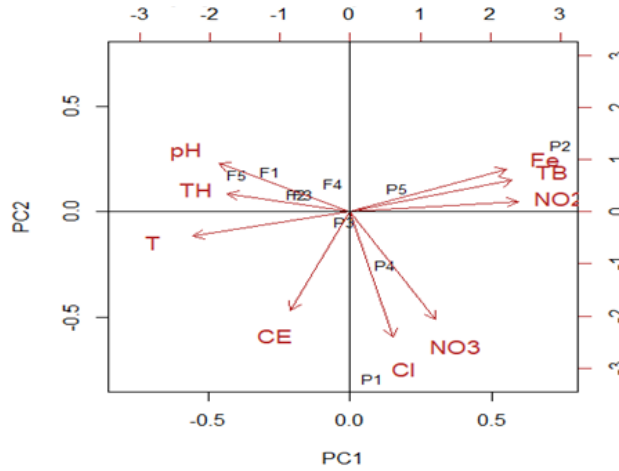


Figure 20 : Biplot de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) des paramètres physico-chimiques – Saison sèche

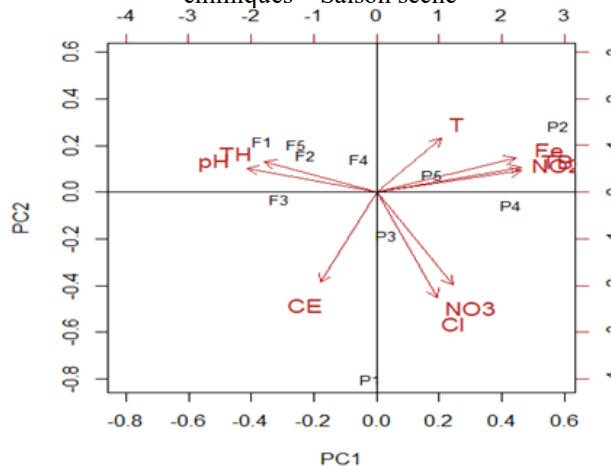


Figure 21 : Biplot de l'ACP des paramètres physico-chimiques – Saison pluvieuse

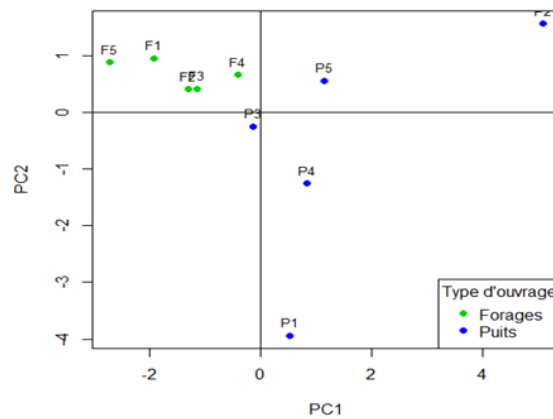


Figure 22 : Projection des points de prélèvement sur le plan factoriel de l'ACP – Saison sèche

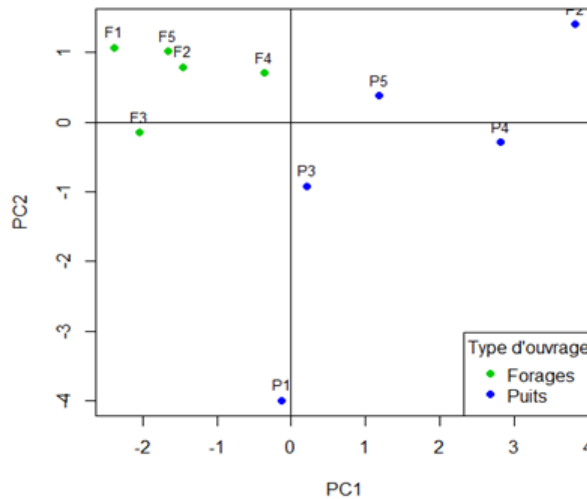


Figure 23 : Projection des points de prélèvement sur le plan factoriel de l'ACP – Saison pluvieuse

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

Les résultats (Figures 20 – 23) révèlent une structuration nette des variables le long de deux axes principaux.

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.

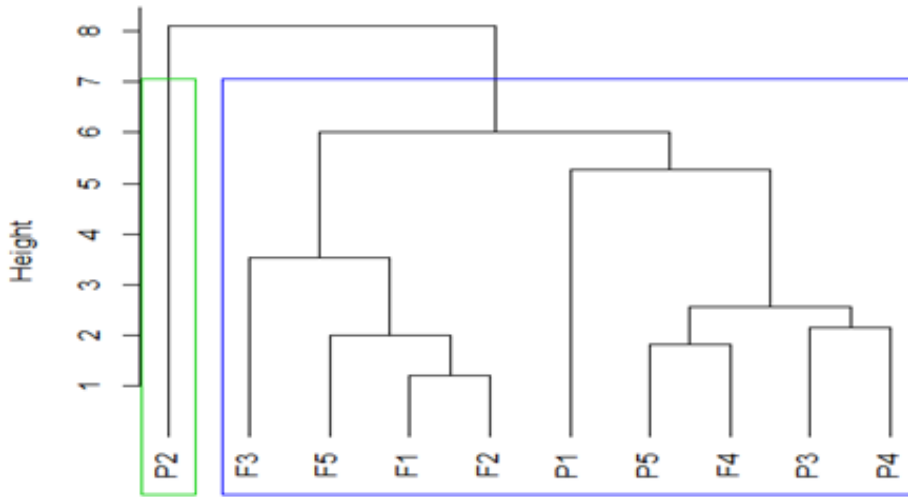
Au cours de la **saison des pluies**, cette structuration est d'autant plus marquée que :

- 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.

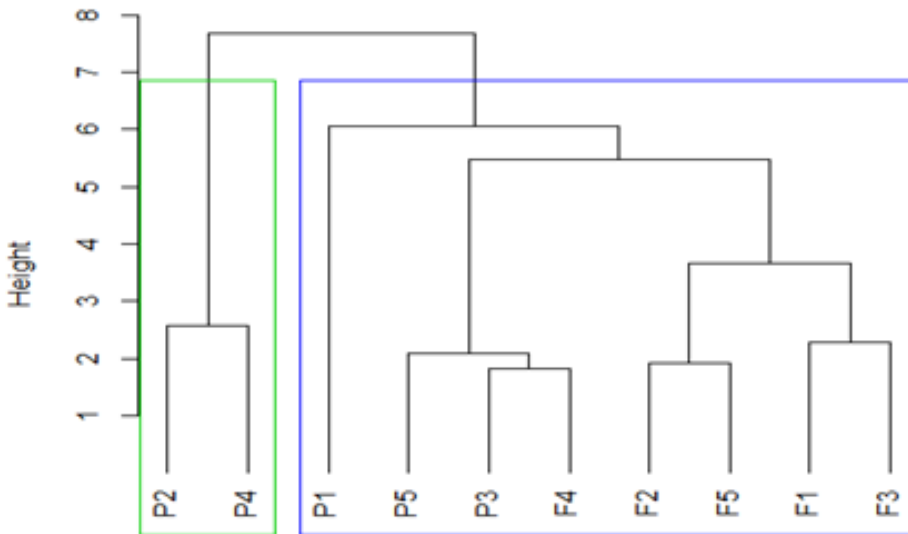
Groupement hiérarchique suivant la similarité entre les paramètres physico-chimiques

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



dist.mat
hclust (*, "ward.D2")

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



dist.mat
hclust (*, "ward.D2")

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

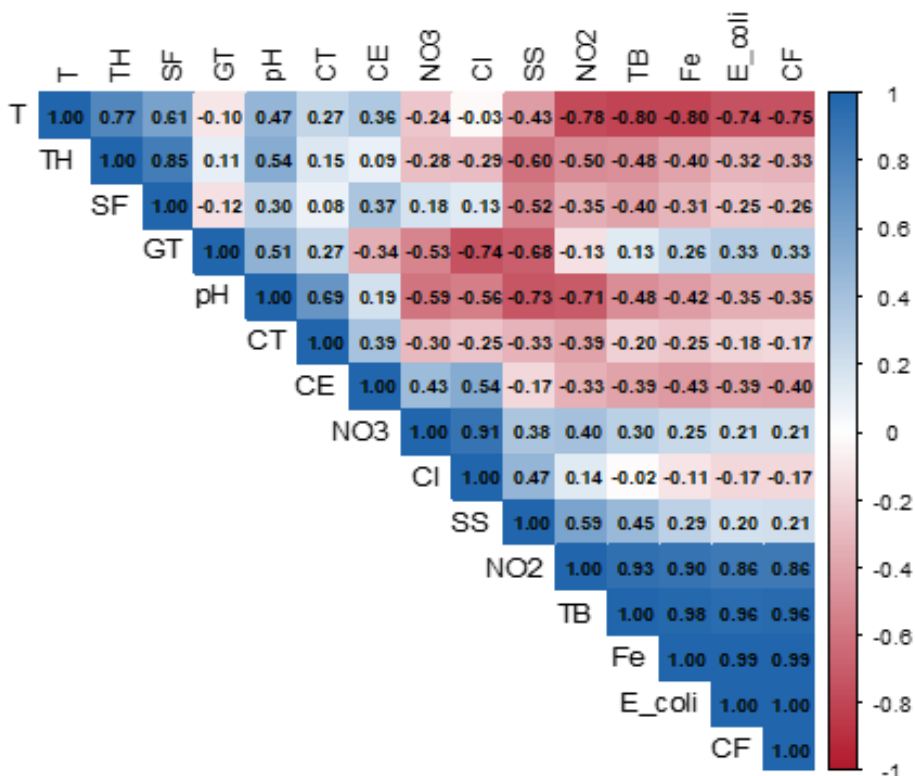


Figure 26 : Matrice de corrélation de Pearson des paramètres physico-chimiques et microbiologiques (Saison sèche)

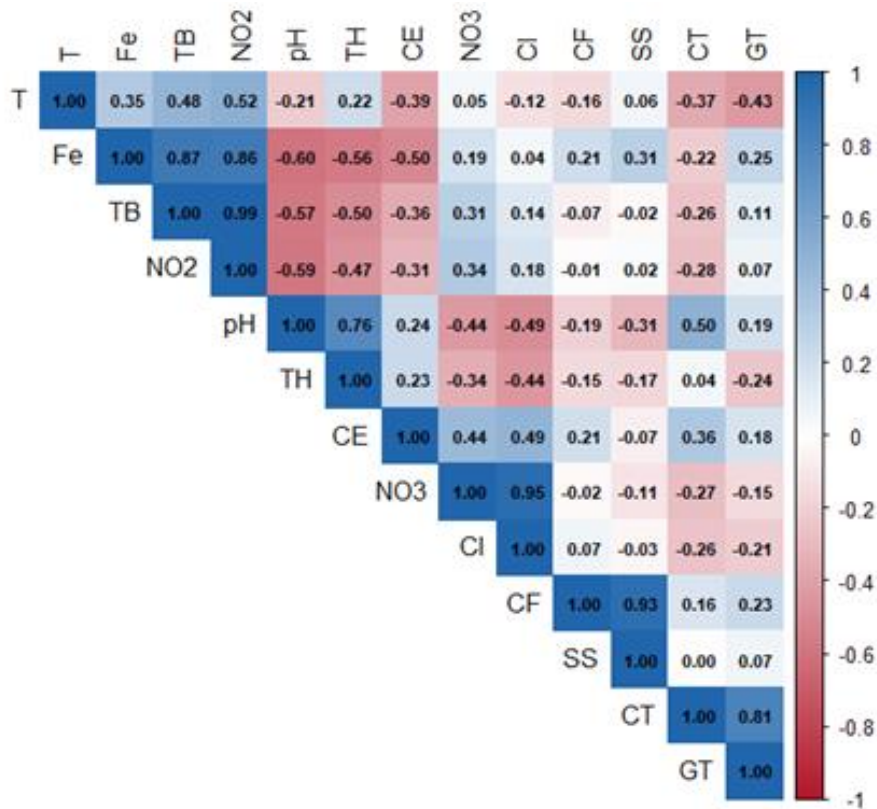


Figure 27 : Matrice de corrélation de Pearson (Saison pluvieuse)

Les matrices de corrélation viennent confirmer les liens observés dans l'ACP. On remarque :

- Des corrélations fortement positives entre TB (0,45), Fe (0,29), NO_2^- (0,59) et les indicateurs microbiologiques (Salmonella Shigella, Germes totaux),
- Une association entre CE (0,54), NO_3^- (0,91) et Cl^- traduisant l'origine géochimique des eaux,
- Des corrélations négatives entre pH et certains paramètres de contamination (NO_2^- (-0,59) ; TB (-0,57) ; Fe (-0,60)).

La forte corrélation entre la turbidité et les paramètres microbiologiques confirme que la présence de particules en suspension favorise la survie et le transport des micro-organismes, ce qui indique une contamination d'origine fécale.

- **Fortes corrélations positives** (exemple : 0,81 – 1,00) entre les paramètres microbiologiques (CT, CF, E. coli, SS et germes totaux).
- Il existe une **corrélation positive** entre la turbidité (0,13 – 0,96) et la contamination bactérienne (Germes totaux, E-coli et CF), ce qui

signifie que les matières en suspension favorisent la survie des micro-organismes.

- Des **corrélations négatives** entre le pH (-0,35 et -0,73) et certains paramètres microbiologiques (SS, E-coli, CF) indiquent que l'acidité pourrait affecter la dynamique bactérienne.

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 identique des eaux souterraines en milieu tropical comme Kisangani et concorde avec les résultats obtenus dans d'autres études (Ahoussi, 2018 ; Chapman, 1996 ; WHO, 2017). L'acidité observée dans plusieurs échantillons ($\text{pH} < 6,5$) est cohérente avec les études réalisées en République Démocratique du Congo et dans d'autres villes africaines (Ahoussi, 2018 ; Assi, 2020 ; 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.

Les valeurs modérées de conductivité électrique (CE) traduisent une minéralisation globale faible à moyenne, comparable à celle observée par Ako et al. (2011) au Cameroun et Ahoussi et al. (2018) en Côte-d'Ivoire. Cette minéralisation semble principalement être contrôlée par les interactions eau-roche, comme en témoigne l'association entre la conductivité, les nitrates et les ions chlorures mise en évidence par l'ACP.

L'utilisation des analyses multivariées est un élément clé de cette étude. L'Analyse en Composantes Principales met en évidence une opposition nette entre deux groupes de variables : d'une part, les paramètres liés à la minéralisation naturelle (CE, NO_3^- , Cl^-) et, d'autre part, ceux associés à la contamination (turbidité, Fe, NO_2^-). L'inclusion de la turbidité (TB) dans l'analyse a permis de mieux structurer ce deuxième groupe, renforçant son rôle d'indicateur de dégradation de la qualité de l'eau.

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).

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. 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, montrant une contamination généralisée des eaux, particulièrement marquée dans les puits. Ces résultats corroborent ceux de Howard et al. (2003), qui ont montré que les ouvrages non protégés sont fortement exposés aux contaminations fécales. Les études menées en RDC ont également montré que les eaux souterraines étaient fortement contaminées (Bisimwa, 2022 ; Nathan, 2023).

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 clairement en évidence la vulnérabilité des puits par rapport aux forages, ainsi que le rôle déterminant des facteurs environnementaux et anthropiques dans la dégradation de la qualité des eaux.

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 montrent que, bien que la plupart des paramètres physico-chimiques soient globalement conformes aux recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé, certaines anomalies persistent, notamment en ce qui concerne le pH, la turbidité et les concentrations en fer.

L'analyse multivariée a permis de distinguer clairement les processus de minéralisation naturelle des phénomènes de contamination.

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, K. N., Kouassi, M. A., & Koffi, B. Y. (2018). Étude des caractérisations hydrogéochimiques et microbiologiques des eaux de consommation de la zone périurbaine

- de la ville de Man (Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*. <https://doi.org/10.4314/ijbcs.v11i6.37>
3. Ako, A. A., et al. (2011). Evaluation of groundwater quality in Cameroon. *Environmental Geochemistry and Health*, 33, 559–575.
 4. 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>
 5. Bennasser, L. (1997). Diagnose de l'état de l'environnement dans la plaine du Gharb (Thèse de doctorat).
 6. Bisimwa, A. M., et al. (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. <https://iris.who.int/handle/10665/41850>
 8. Chevalier, P. (2003). Turbidité et qualité de l'eau potable. <https://www.inspq.qc.ca/eau-potable/turbidite>
 9. 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.
 10. Howard, G., Pedley, S., Barrett, M., Nalubega, M., & Johal, K. (2003). Risk factors contributing to microbiological contamination. *Water Research*, 37, 3421–3429.
 11. International Organization for Standardization. (1988). ISO 8199: Water quality—General guide to the enumeration of microorganisms.
 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). <https://doi.org/10.52155/ijpsat.v47.2.672>
 13. 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.
 14. 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>
 15. Nzomba, D. (2023). Hydrogéochimie et contamination des eaux souterraines à Kinshasa. <http://www.afriquescience.net/>
 16. 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
17. Rodier, J., Legube, B., Merlet, N., & Brunet, R. (2009). L'analyse de l'eau (9e éd.).
 18. Shrestha, S., & Kazama, F. (2007). Assessment of surface water quality. *Environmental Modelling and Software*, 22, 464–475.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.02.00>
 19. UN-Habitat. (Consulté le 18 Avril 2026). Rapport ville de Kisangani.
<https://unhabitat.org/sites/default/files/download-manager-file/RAPPORT%20%20VILLE%20KISANGANI.pdf>
 20. University of Batna 2. (Consulté le 19 Février 2026). Microbiologie de l'eau. https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/zerroug-mohamed-mihoub/files/chapitre_2_microbiologie_de_leau.pdf
 21. 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>
 22. World Health Organization. (2017). Guidelines for drinking-water quality (4th ed.).