

## Caractérisation Physico-Chimique de eaux de Puits et Forages destinée à la consommation Humaine dans la Ville de Kisangani (RDC) : Cas de Commune Makiso

***Moussa Issoufou Djibo***

Mastérent, 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

***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., & Dowiya Nzawe, B. (2026). *Caractérisation Physico-Chimique de eaux de Puits et Forages destinée à la consommation Humaine dans la Ville de Kisangani (RDC) : Cas de Commune Makiso*. ESI Preprints. <https://doi.org/10.19044/esipreprint.5.2026.p450>

---

### Résumé

La population de la ville de Kisangani, particulièrement celle de la commune Makiso, consomment majoritairement les eaux de puits et de forages pour combler l'insuffisance de distribution d'eau potable liées aux réseaux public fournie par la REGIDESO. Ainsi, ce présent travail a pour objectif de caractériser les paramètres physico-chimiques de ces eaux alternatives. Il a permis l'évaluation au niveau de cinq puits et cinq forages

des paramètres tels que la température, le pH, la conductivité électrique, la couleur, l'odeur, la dureté totale, le nitrate, le nitrite, le fer total et le chlorure pendant la saison pluvieuse. Les valeurs moyennes sont comparées de la qualité de l'eau de boisson de l'Organisation Mondiale de la Santé. Il ressort de résultats que les eaux ont un pH acide avec des valeurs moyenne comprises entre 4,9 - 5,2 pour le puits et 5,1 – 6,1 pour les forages. Certains puits (P2) ont présenté une valeur en nitrite (0,21mg/l) et en turbidité (38,7 NTU) supérieure à la norme de référence. A la lumière des paramètres analysés, la qualité chimique des autres sources d'eau peut être considérée comme globalement conforme.

---

**Mots clés :** Eaux ; Puits ; Forages ; Paramètres Physico-Chimique ; Norme ; qualité de l'eau

---

## **Physicochemical Characterization of Well and Borehole Water Intended for Human Consumption in Kisangani (DRC) : Case of Makiso Municipality**

*Moussa Issoufou Djibo*

Mastérant, 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

*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

---

### **Abstract**

The population of the city of Kisangani, particularly that of Makiso commune, mainly consume water from wells and boreholes to make up for the shortage of drinking water distribution linked to public networks

provided by REGIDESO. Thus, this present work aims to characterize the physicochemical parameters of these alternative waters. It allowed the evaluation at the level of five wells and five boreholes by parameters such as temperature, pH, electrical conductivity, color, smelling, total hardness, nitrate, nitrite, total iron and chloride ion. The average values are compared to the drinking water quality standard values of the World Health Organization. It appears from results that the waters have an acidic pH with average values between 4.9 - 5.2 for the well and 5.1 - 6.1 for the drilling while, certain wells have a nitrite (0.21 mg/l) and turbidity (38,7NTU) value higher than the standard of reference. In light of the parameters analyzed, the chemical quality of the different water sources can be considered generally compliant.

---

**Keywords:** Waters; Well; Drilling; Physico-Chemical Parameters; Standard; water quality

## 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 essentiel 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 écosystémique 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'utilisations des engrais, des pesticides et des fumiers ; mais aussi le manque de la sensibilisation de population en vers 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 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 (WHO, 2023).

Dans la commune Makiso, les eaux de puits et de forages constituent une source d'approvisionnement incontournable en eau de boissons pour des 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 tournés vers des solutions

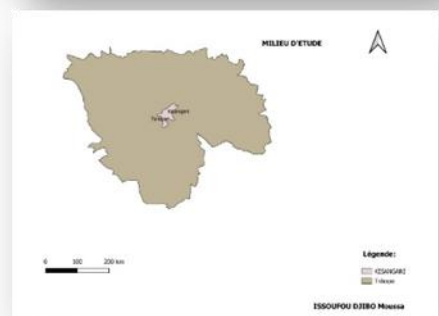
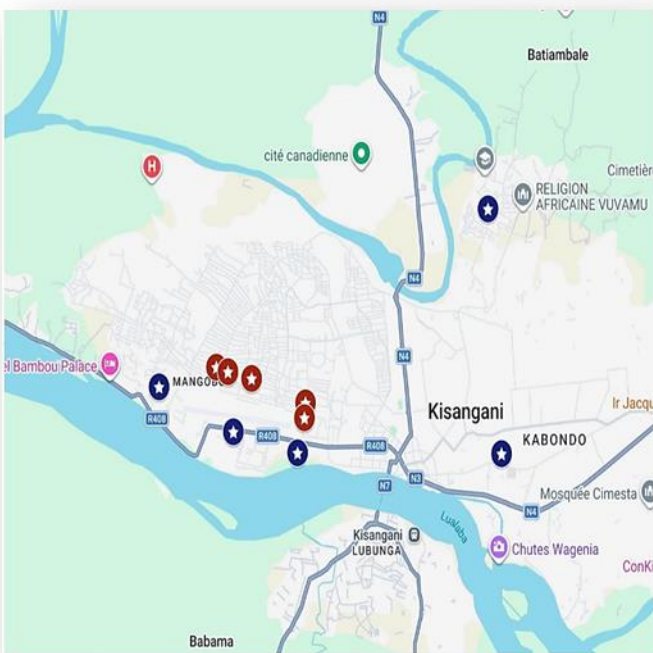
alternatives (les eaux de forages et de puits). Ces sources locales d'eau comblent désormais les besoins essentiels des ménages en matière de : l'eau de boisson, de cuisson, et de lavage.

C'est dans ce contexte que la présente étude a pour objectif : l'évaluation de la qualité physico-chimique des eaux de puits et 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 de 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 Km<sup>2</sup> 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).



Légende :

-  **Forages**
-  **Puits**

**Figure 1** : Localisation de la zone d'étude

## Echantillonnage

Les échantillons ont été constitués des eaux de cinq puits et de cinq forages analysés tout au long de mois de Novembre 2025 comme saison pluvieuse soit trente échantillons au total. Ces échantillons ont été collectés durant trois campagnes d'échantillonnage pendant la période de cette étude de 7h00 AM à 14h00 PM (GMT+2) à l'aide des bouteilles en polyéthylène de 750 ml préalablement lavés avec le détergent, puis rincées à l'eau distillée et trois fois avec l'eau à analyser avant prélèvement (AQUAREF, 2011). Ils sont conservés dans une glacière contenant de glaçon à 4 °C jusqu'au laboratoire central d'analyses d'eau de la REGIDESO pour les analyses chimiques ultérieure (Rodier et al., 2009).

## Méthodes d'analyses physico-chimiques

Le tableau 1 résume l'ensemble des 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)
<b>pH</b>	Méthode de mesure terrain à l'aide de multimètre portable Hach HQ40d, Hanna Instruments HI 98128	<b>(Kanadana et al., 2023)</b>
<b>Température (°C)</b>		
<b>Conductivité (<math>\mu\text{S} / \text{cm}</math>)</b>		
<b>Couleur et Odeur</b>	Organes de sens	<b>(Myouezolo et al., 2023)</b>
<b>Turbidité (NTU)</b>	Méthodes quantitatives de mesure de la turbidité à l'aide de nephelomètres et de turbidimètres optiques	ISO 7027-1,2016 (F)
<b>Dureté (TH) mg/l</b>	Dosage Complexométrie à l'EDTA avec le noir ériochrome T (NTE)	NORME ISO 6059,1984
<b>Nitrates (<math>\text{NO}_3^-</math>) mg/l</b>	Méthode de réduction au cadmium et spectrophotomètre HACH	NORME ISO 6740-1985 (F)
<b>Nitrites (<math>\text{NO}_2^-</math>) mg/l</b>	Méthode par diazotation et spectrophotomètre HACH	NORME ISO 6777-1984 (F)
<b>Fer total (Fe) mg/l</b>	Méthode spectrométrique à la phénantroline-1,10	NORME ISO 6332 : 1988 (F)
<b>Chlorures (<math>\text{Cl}^-</math>) mg/l</b>	Méthode Argentimétrie (Méthode de MOHR)	NORME ISO 9297,1989

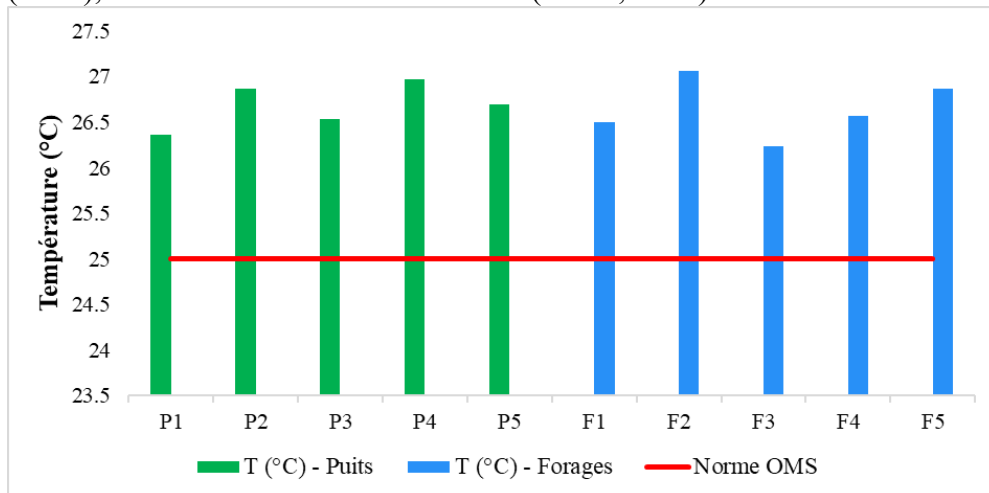
Les données collectées ont été soumises aux analyses statistiques comme : la statistique descriptive, les analyses en Composantes Principales (ACP) et les analyses hiérarchiques ascendantes à l'aide de moyennes Euclidiennes à travers le logiciel R (4.3.3) et Excel (2016).

## Résultats et Discussion

Les résultats de ces analyses sont présentés sous des figures de 1 à 10 décrits ci-dessous.

### Température

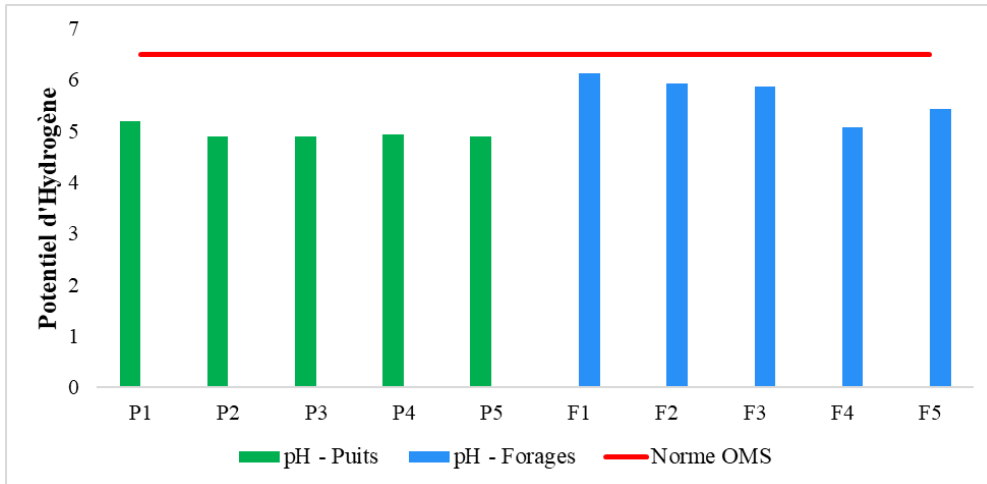
La **Figure 2**, indique que les températures moyennes des eaux étudiées sont comprises entre 26,3 à 27°C pour les puits et 26,5 à 27,2°C pour les forages, sont supérieure à la valeur recommandée par l’OMS (25°C), rendant ces eaux non conformes (WHO, 2011).



**Figure 2 :** La variation de température des eaux étudiée (Puits et forages)

### Potentiel d'hydrogène (pH)

La **Figure 3** met en évidence un pH légèrement plus faible dans les eaux de puits comparativement à celles de forages. Cette différence peut s'expliquer par plusieurs facteurs, notamment les précipitations, la nature du sol, de roches environnantes, la proximité des latrines, le pluviollessivage des sols ainsi que les caractéristiques de l'environnement immédiat, qui contribuent à l'acidification des eaux souterraines (WHO, 2011). Par ailleurs, les opérations de chloration peuvent également entraîner une diminution du pH. Les valeurs du pH des eaux de puits s'échelonnent entre 4,9 et 5,2, tandis que celles des eaux de forages varient de 5,0 à 6,13. Il ressort ainsi que les eaux de la commune de Makiso à Kisangani présentent un caractère acide et ne respectent pas les normes de potabilité établies par l'Organisation mondiale de la santé, comprises entre 6,5 et 8,5.

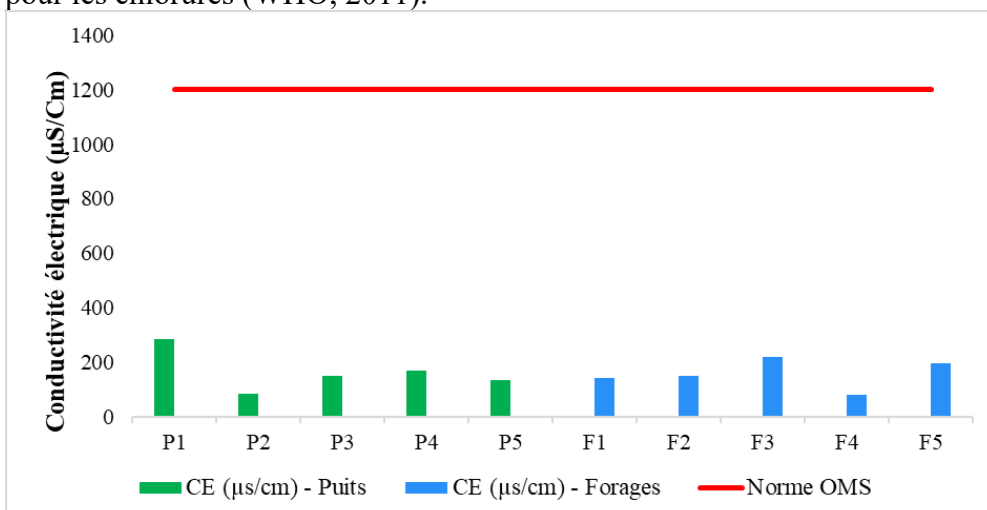


**Figure 3 :** Variation du potentiel d'Hydrogène (pH) des eaux étudiée (Puits et forages)

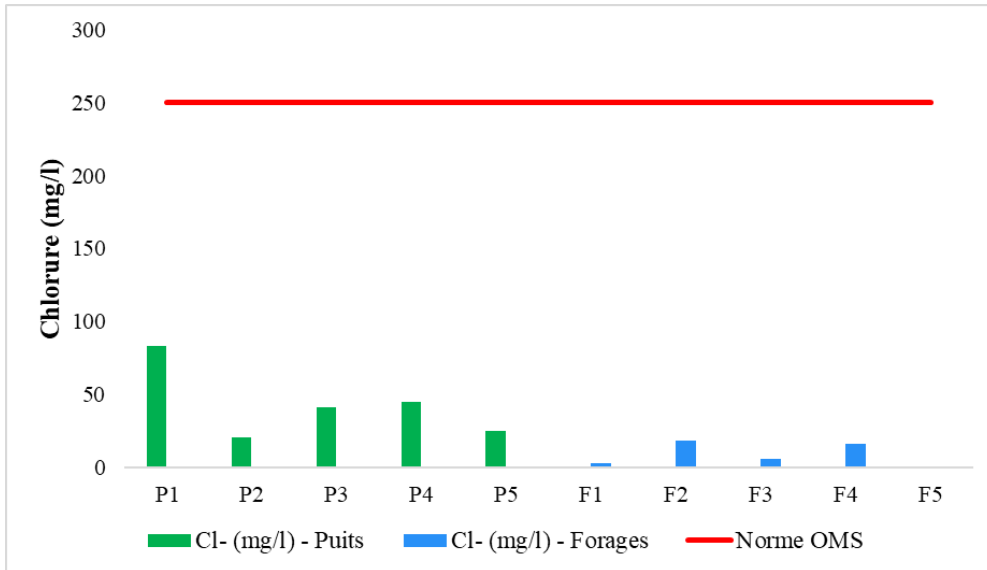
### Conductivité électrique et ion chlorure

Les résultats obtenus montrent une faible variation des valeurs moyennes de la conductivité électrique des eaux de puits et de forages (Figure 4). Celles-ci varient de 83,46 à 285,9  $\mu\text{S}/\text{cm}$  pour les puits et 79,9 à 218,93  $\mu\text{S}/\text{cm}$  pour les forages. De même, les concentrations moyennes en ions chlorures (Figure 5) s'échelonnent entre 20,83 et 83,38 mg/l pour les eaux de puits et entre 0,46 et 18,47 mg/l pour les eaux de forages.

Ces résultats indiquent une faible minéralisation des eaux étudiées, traduisant l'absence de pollution importante. L'ensemble des valeurs mesurées reste conforme aux recommandations de l'Organisation mondiale de la santé, fixées à 1200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  pour la conductivité électrique et à 250 mg/l pour les chlorures (WHO, 2011).



**Figure 4 :** La variation de la conductivité électrique des eaux étudiée (Puits et forages)



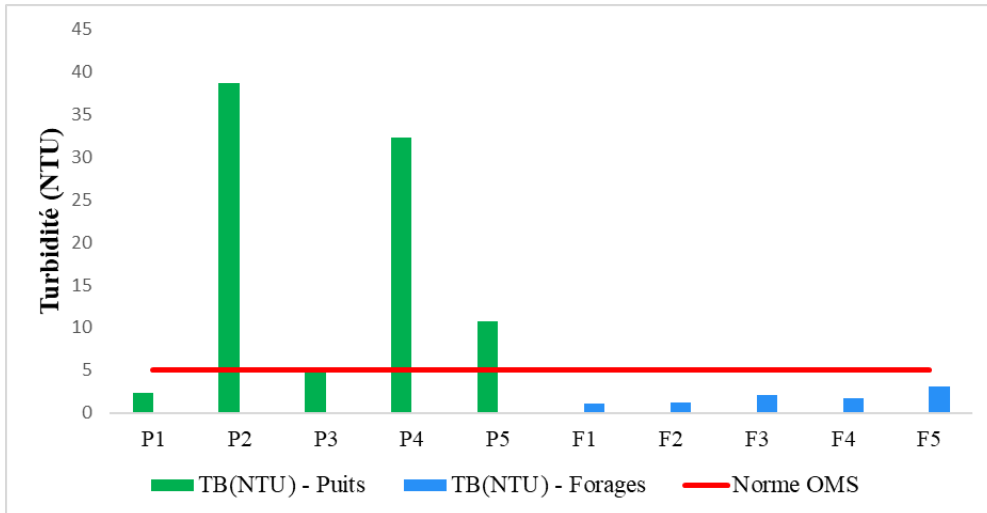
**Figure 5 :** Variation d'ions chlorures des eaux étudiée (Puits et forages)

## Turbidité

La turbidité de l'eau est liée à la présence de particules solides en suspension ou dissoutes, qui perturbent la diffusion de la lumière et de donner à l'eau un aspect trouble (Nawaz et al., 2023). Des niveaux élevés de turbidité peuvent réduire l'efficacité des procédés de désinfection, notamment par chloration et par rayonnement ultraviolet, ce qui favorise la persistance des micro-organismes pathogènes (Nawaz et al., 2023 ; Testa et al., 2022).

Les résultats présentés à la **Figure 6** indiquent que les eaux de forages se caractérisent par une faible turbidité, avec des valeurs moyennes comprises entre 1,1 et 3,13 NTU. En revanche, la majorité des eaux de puits présente des valeurs nettement plus élevées, atteignant une moyenne maximale de 38,7 NTU. Ces observations montrent que les eaux de forages respectent les recommandations de l'Organisation mondiale de la santé, qui fixe une limite de turbidité inférieure à 5 NTU pour l'eau destinée à la consommation humaine.

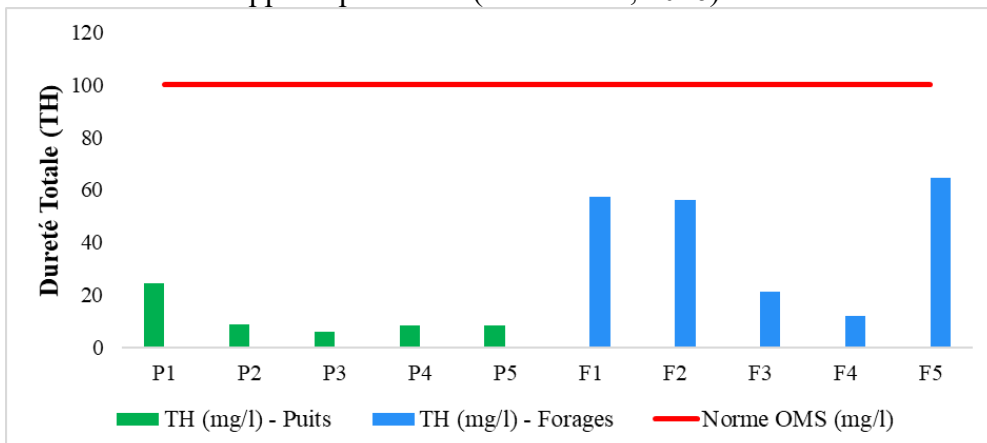
Les valeurs élevées observées dans les eaux de puits pourraient s'expliquer par les pratiques de puisage, qui entraînent l'agitation de l'eau et la remise en suspension des particules du sol environnant. En revanche, l'absence de coloration et d'odeur dans la quasi-totalité des points d'eau (Puits et Forages), appréciée directement sur terrain par l'évaluation sensorielle, peut être attribuée aux phénomènes de filtration naturelle des matières en suspension lors de l'infiltration de l'eau à travers les différentes couches du sol.



**Figure 6 :** Variation de la turbidité des eaux étudiée (Puits et forages)

### La Dureté totale ou Titre Hydrotimétrique (TH)

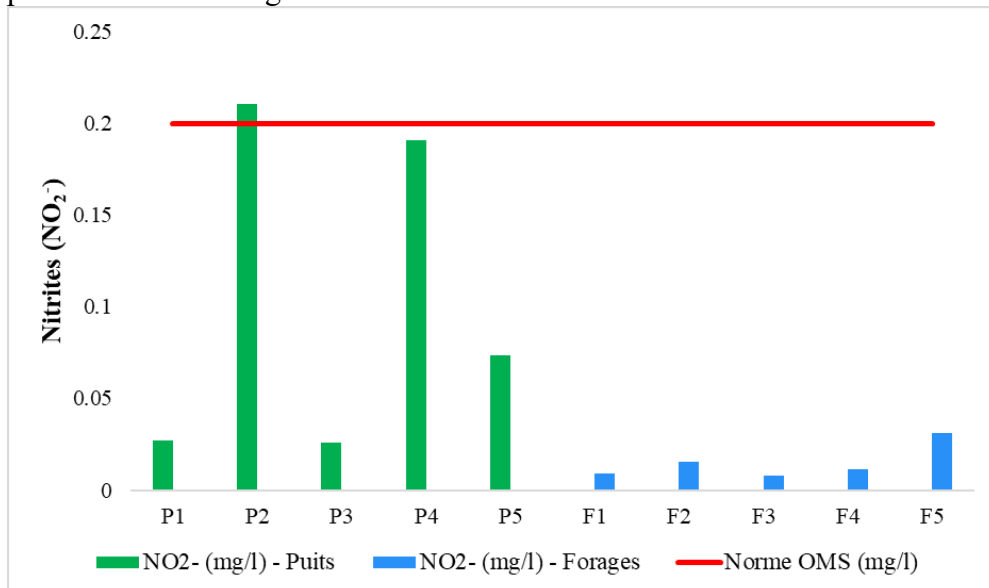
La dureté de l'eau reflète principalement sa teneur en ions calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) et magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ). Dans les eaux naturelles, ce paramètre est étroitement lié à la nature géologique des formations traversées lors de l'infiltration. Les résultats obtenus (**Figure 7**) montrent que les eaux de puits et forages de la commune de Makiso présentent une dureté globalement faible, traduisant un caractère très doux. Les valeurs moyennes de la dureté totale (TH) varient entre 6 et 24,33 mg/l pour les eaux de puits et entre 12 et 57,33 mg/l pour les eaux de forages. L'ensemble de ces valeurs reste largement inférieur aux limites recommandées par l'Organisation mondiale de la Santé pour l'eau destinée à la consommation humaine, comprises entre 100 et 300 mg/l (WHO, 2011) Cependant, ces résultats ont une légère similarité à ceux rapporté par Saana (Saana et al., 2016).



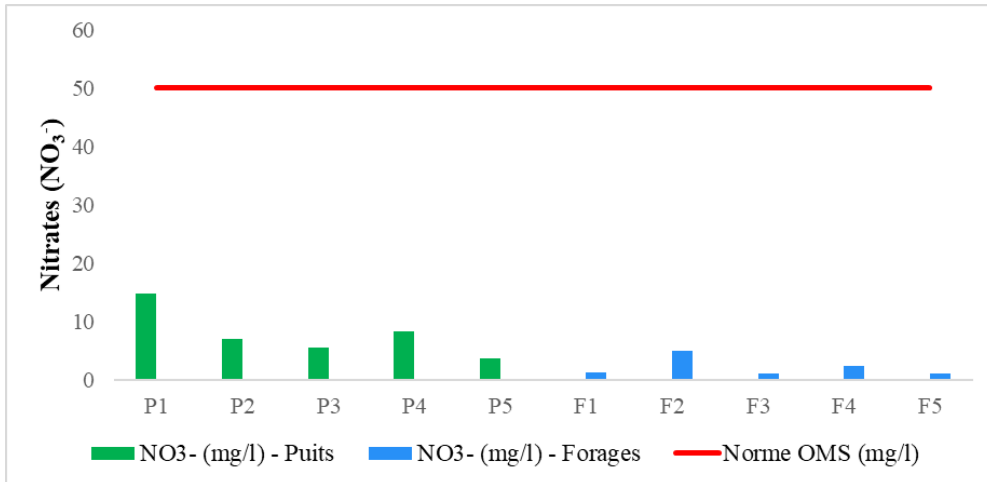
**Figure 7 :** Variation de la dureté totale (TH) des eaux étudiée (Puits et forages)

## Les Nitrites et Nitrates

Les nitrites se trouvent couramment dans les sols, les eaux, les aliments et l'atmosphère, mais généralement à des concentrations inférieures à celles des nitrates. Ils résultent souvent d'une oxydation partielle des matières organiques, de la réduction des nitrates par des bactéries anaérobies sulfito-réductrices, ou encore de l'oxydation bactérienne de l'ammoniac (Bengoumi et al., 2004). En excès dans l'eau, ils en altèrent la qualité en raison de leur fort pouvoir oxydant, avec des impacts potentiels sur la santé humaine. Les analyses des teneurs en nitrites dans les échantillons d'eau prélevés à divers points montrent des niveaux plus élevés dans les puits, avec des moyennes variant de 0,027 à 0,21 mg/L (Figure 8). Cette augmentation s'explique probablement par le lessivage des sols, qui concentre ces composés minéraux dans ces sources. En particulier, le ruissellement des engrais agricoles peut fortement contaminer les nappes phréatiques superficielles. Ces résultats concordent d'ailleurs avec ceux rapportés par Hane et al. (2020), qui ont observé des concentrations dépassant 0,61 mg/L dans les eaux de puits et de forages de la région de Tambacounda. À l'inverse, les concentrations en nitrates mesurées dans ces mêmes échantillons respectent toutes les normes de l'OMS (WHO, 2011) comme on peut le voir sur la Figure 9.



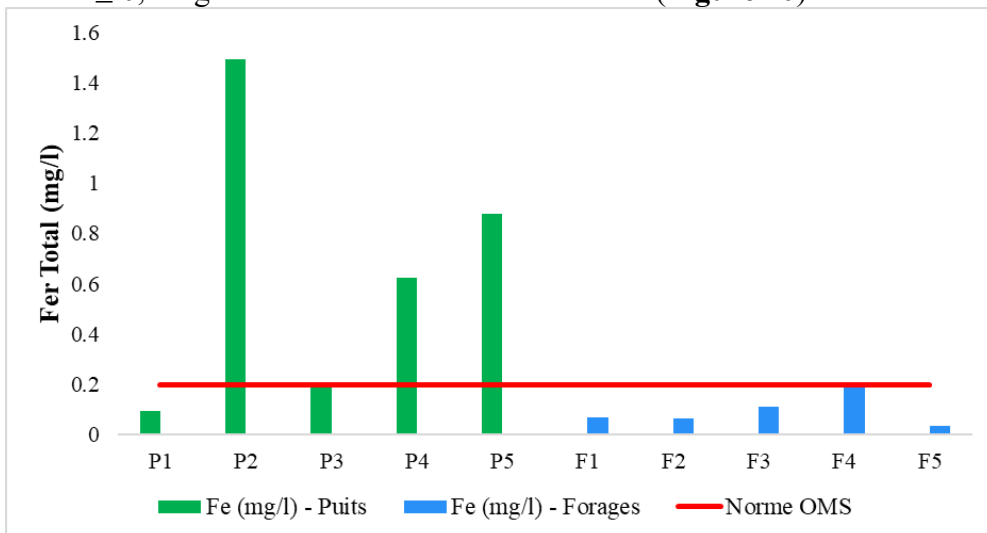
**Figure 8 :** Variation de Nitrites (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) des eaux étudiée (Puits et forages)



**Figure 9 :** Variation de Nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) des eaux étudiée (Puits et forages)

### Fer Total

D'après l'Organisation Mondiale de la Santé (**WHO, 2011**), une eau destinée à la consommation humaine ne doit pas renfermer de Fer total à une teneur supérieure à 0,2 mg/l. Les valeurs obtenues du fer total dans certains puits (P2, P4, P5) ont révélé la présence de teneurs anormales par rapport aux normes, contrairement aux eaux forages et certains puits (P1 et P3) se situent à  $\leq 0,2$  mg/l à la valeur normale de référence (**Figure 10**).



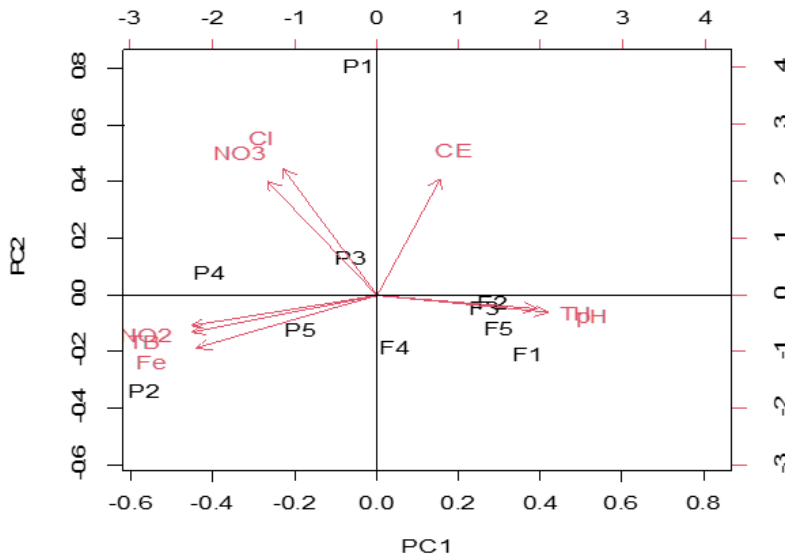
**Figure 10 :** La variation du Fer total des eaux étudiée (Puits et forages)

### Analyse en composante principale (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP), beaucoup utilisée pour interpréter les données hydro-chimiques (Bennasser, 1997) a été appliquée 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 (**Figure 11**). Pour traiter ces données, huit (8) variables ont été utilisées à savoir : le pH, la conductivité électrique (CE), la turbidité, les ions ( $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ , Fe, TH et Cl).

Les résultats (Figure 10) montrent que les deux premières composantes expliquent 81,15 % de la variance totale des données. La première composante principale (PC1) explique à elle seule 52,12 % de la variance, tandis que la deuxième composante principale (PC2) contribue à hauteur de 29,03 %. Ces résultats indiquent que l'essentiel de l'information est bien représenté dans le plan factoriel (PC1  $\times$  PC2).



**Figure 11** : Contribution des paramètres physico-chimiques dans la qualité de l'eau

## Interprétation

Les échantillons positionnés du côté négatif de PC1 présentent des niveaux élevés de turbidité, souvent supérieurs aux valeurs guides recommandées par l'OMS ( $\text{OMS} \leq 5 \text{ NTU}$ , idéal  $< 1 \text{ NTU}$ ), traduisant une vulnérabilité des puits à la contamination de surface.

La corrélation entre le fer total et la turbidité suggère une origine géogénique combinée à des conditions réductrices dans les ouvrages peu profonds, ce qui explique certains dépassements de la valeur guide OMS ( $\text{OMS} \leq 0,3 \text{ mg/L}$ ).

La position des nitrites sur PC1 indique une influence anthropique marquée, probablement liée à l'infiltration des eaux usées et à l'absence de protection sanitaire autour de certains puits ( $\text{OMS} \leq 0,2 \text{ mg/L}$ ).

Bien que les concentrations en nitrates restent globalement inférieures à la valeur guide OMS, leur association avec la conductivité et les chlorures indique une minéralisation accrue liée aux activités humaines et à

la circulation souterraine prolongée, particulièrement dans les forages (OMS  $\leq 50$  mg/L).

Les faibles variations du pH observées, bien que proches de la limite inférieure recommandée par l'OMS, n'ont pas montré d'influence majeure sur la structuration globale des données, mais peuvent favoriser la solubilisation du fer (OMS : 6,5 – 8,5).

L'analyse en composantes principales nous a permis de mieux comprendre les relations entre les paramètres physico-chimique des eaux de puits et de forages consommées dans la commune de Makiso. Les deux premières composantes expliquent 81,15 % de la variance totale, traduisant une bonne représentation des données.

En effet, l'axe principal (PC1) apparait comme un gradient majeur de minéralisation. Du côté positif de cet axe se regroupent les forages (F1, F2, F3, F4 et F4), associées à des valeurs élevées de conductivité électrique (CE), de pH et de dureté totale (TH) corrélés positivement. Cette configuration suggère que les eaux de forages sont principalement influencées par le processus naturels (l'eau dissous lentement les minéraux des roches) tels que lessivage, interaction eau-roche. La forte contribution de la conductivité électrique, matérialisée par une flèche bien orienté confirme son rôle déterminant dans la structuration chimique des eaux profondes. Les forages sont projettes dans la direction de la flèche pH, cela signifie que le pH contribue fortement à la caractérisation des ces forages ; des valeurs de pH relativement élevées ou homogènes. Ceci permet de dire que l'eau de forages est favorable à la potabilité (pH n'est pas un facteur limitant). A l'inverse, la partie négative de l'axe PC1 est dominée par les Nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) ; les Nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ), le fer (Fe), le chlorure ( $\text{Cl}^-$ ). La proximité et le parallélisme des flèches de ces variables indiquent des corrélations positives, traduisant une origine commune ou des processus similaires.

Les puits P1, P2, P3 et P5 se projettent majoritairement dans cette zone, ce qui permet de dire qu'en particulier les puits (P2 et P5) ont un taux élevé de fer et de nitrites. Ces puits P2 et P5 sont plus proche de  $\text{NO}_2^-$  et Fe alors que les autres ne le sont pas, ce qui signifie que ces deux sont localement plus affectés. Probablement situés dans des zones proches des sources de pollution ou mal drainées. Par contre P3 et P4 sont riches en chlorure et nitrate. Cette association est caractéristique d'une influence anthropique, notamment liées à l'influence anthropiques, les latrines non étanches ou les activités agricoles, la décomposition des déchets organisations.

L'axe secondaire (PC2) permet de discerner d'avantage les processus affectant la qualité de l'eau. Le cadran supérieur gauche, où se concentre les chlorures et les nitrates, reflète un signal de pollution souvent associée aux

activités anthropiques. Les puits dans ces zones sont peu profonds et sont donc influencés rapidement par les activités humaines environnantes.

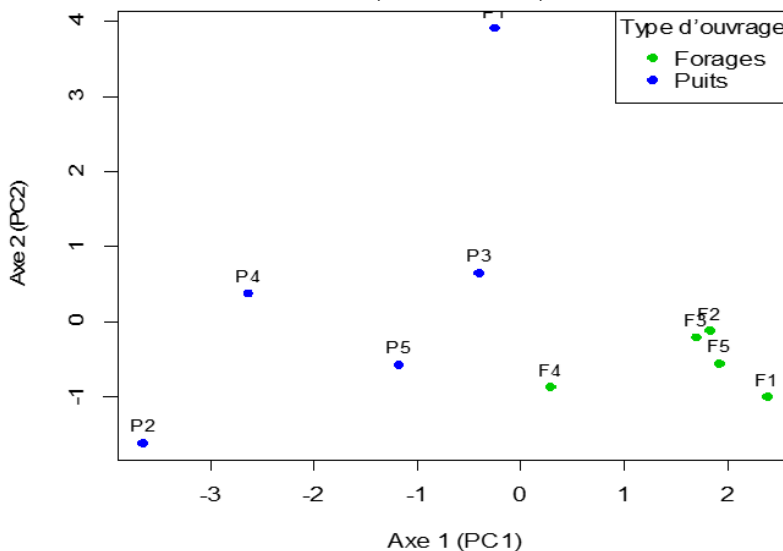
Le puits P1 présente une position intermédiaire dans le plan factoriel indiquant une composition chimique mixte. Il est influencé à la fois par des paramètres de minéralisation et par des apports anthropiques. C'est un puits moyennement profond (ou trop profond), où les processus naturels et influences humaines coexistent.

Ainsi, l'ACP confirme que les dépassements des valeurs guides OMS sont principalement liés aux puits, tandis que les eaux de forages présentent une meilleure qualité physico-chimique, bien que caractérisées par une minéralisation plus élevée.

### Présentation individuelle des ouvrages (Puits et Forages) en composantes principales

La **Figure 12** illustre la projection des différents ouvrages sur le plan factoriel PC1–PC2. Une séparation relativement nette est observée entre les forages et les puits. Les forages apparaissent regroupés, témoignant d'une certaine homogénéité de leur qualité physico-chimique. Cette homogénéité suggère une meilleure protection naturelle contre les contaminations superficielles. En revanche, les puits présentent une dispersion plus importante, traduisant des conditions environnementales variables et une exposition directe aux sources potentielles de pollution.

Certains puits sont particulièrement associés à des concentrations élevées en nitrates, nitrites et fer, ce qui peut représenter un risque pour la consommation humaine, notamment au regard des recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (WHO, 2011).



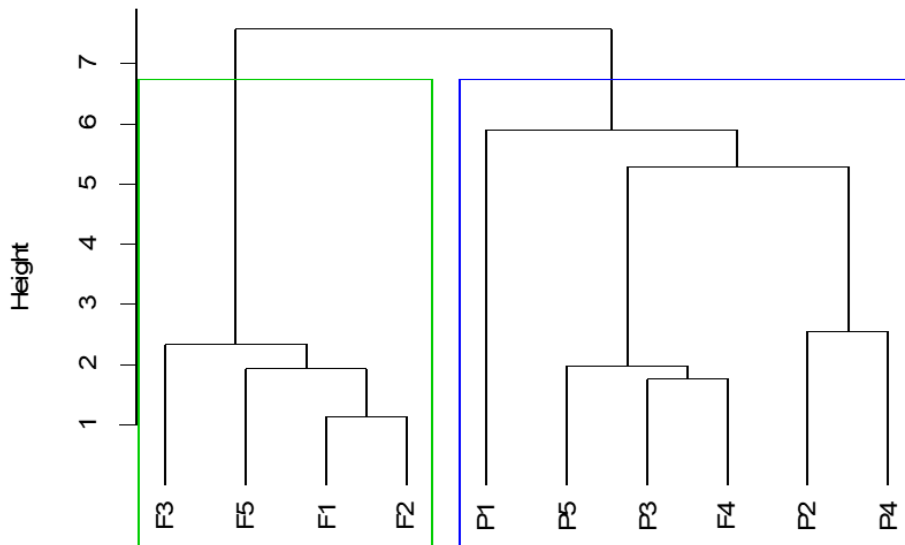
**Figure 12** : Analyse en Composant Principale individuelle des ouvrages

### Classification hiérarchique et dendrogramme

Afin de compléter les résultats de l'ACP, une classification hiérarchique ascendante a été réalisée. Le dendrogramme obtenu (**Figure 13**) permet de regrouper les ouvrages selon la similarité de leurs caractéristiques physico-chimiques.

### Deux groupes principaux se distinguent clairement

Le premier cluster regroupe essentiellement les forages. Il est caractérisé par des eaux relativement minéralisées, avec de faibles concentrations en nitrates, nitrites et fer, indiquant une qualité globalement satisfaisante. Le second cluster est majoritairement composé des puits. Ce groupe se caractérise par des teneurs plus élevées en nitrates, nitrites, fer et chlorures, traduisant une forte influence des activités humaines et une vulnérabilité accrue à la contamination.



**Figure 13** : Dendrogramme représentant la classification hiérarchique ascendante des 5 puits et 5 forages obtenue à partir des paramètres physico-chimiques de l'eau

### Caractérisation des clusters par les valeurs moyennes

Le **Tableau 2** présente les valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques pour chaque cluster. Les forages présentent un pH proche de la neutralité, une faible turbidité ainsi que de faibles concentrations en éléments indicateurs de pollution, ce qui suggère une meilleure qualité de l'eau. En revanche, les puits affichent des valeurs moyennes plus élevées en turbidité, nitrates, nitrites, fer et chlorures. Ces résultats confirment les observations issues de l'ACP et du dendrogramme, et mettent en évidence l'impact du type d'ouvrage sur la qualité des eaux souterraines. Dans l'ensemble, la combinaison de l'ACP et de la classification hiérarchique met clairement en

évidence une différence de qualité physico-chimique entre les eaux de puits et de forages dans la commune de Makiso, les puits étant plus exposés aux contaminations d'origine anthropique.

**Tableau 2** : De valeur moyenne de cluster

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

### Conclusion et suggestion

L'étude était centrée sur l'évaluation de la qualité physico-chimique des eaux destinées à la consommation humaine issues de puits et forages. Elle montre que la plupart des paramètres mesurés sont conformes aux valeurs guides recommandées par l'Organisation mondiale de la santé (OMS), en particulier pour les eaux de forages. Cependant, certains puits (notamment P2, P4 et P5) présentant de concentrations élevés en fer total et en nitrites dans le puits P2. Les résultats révèlent des pH acides dans tous les eaux caractérisées. En plus des niveaux de turbidité dépassant la valeur guide de 5 NTU ont été enregistrés dans certains puits, notamment P2, P4 et P5, sans risque sanitaire immédiat pour les consommateurs.

Bien que la plupart des paramètres déterminés sont conformes aux normes de l'OMS, les sources d'eau étudiées demeurent potentiellement vulnérables à la contamination, en raison de leur niveau de protection et de modalités d'exploitation. Par conséquent, la mise en œuvre de stratégies appropriées d'aménagement, de traitement et d'assainissement apparaît indispensable afin de réduire les risques liés au maladies d'origine hydrique dans les zones étudiées. En outre, des actions de sensibilisation et de formation ciblant les usagers de ces ressources, en particulier les femmes et les enfants, sont nécessaires pour limiter les pratiques favorisant la dégradation de la qualité de ces eaux.

**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, cofinance 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_techniques_V_F.pdf)
3. Bengoumi, M., Traouré, A., Bouchriti, N., Bengoumi, D., & El Hraiki, A. (2004). Qualité de l'eau en aviculture.
4. Bennasser, L. (1997). Diagnose de l'état de l'environnement dans la plaine du Gharb (Thèse).
5. Dibi, B., & Assi, C. (2022). Origine de l'acidité des eaux souterraines en Côte d'Ivoire. <https://hdl.handle.net/20.500.12177/9587>
6. Food and Agriculture Organization (FAO). (Consulté le 19 Avril 2026). L'agriculture et l'environnement. <https://www.fao.org/4/y3557f/y3557f11.htm>
7. 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>
8. 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>
9. Kandana, M. Y., Aya, N. B. K., & Droh, L. G. (2023). Assessment of borehole and well water quality.
10. 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)
11. Mvouezolo, M., 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>
12. Nawaz, R., et al. (2023). Water quality index and human health risk assessment. *Toxics*, 11(7), 577. <https://doi.org/10.3390/toxics11070577>
13. Rodier, J., Legube, B., Merlet, N., & Brunet, R. (2009). *L'analyse de l'eau* (9e éd.).
14. Saana, S. B. B. M., et al. (2016). Assessment of groundwater quality in Ghana. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-3676-1>

15. Talpur, H. A., et al. (2024). Drinking water quality and microbial pollution. *HydroResearch*, 7, 248–256. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2024.04.004>
16. Testa, G., Persichetti, G., & Bernini, R. (2022). Optical spectroscopy for water monitoring. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-08262-7\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-08262-7_8)
17. 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>
18. World Health Organization (WHO). (2023). Eau potable. <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/drinking-water>
19. World Health Organization. (WHO, 2011). Guidelines for drinking-water quality.