Health Sciences & Disease
The Journal of Medicine and Biomedical Sciences
EISSN: 2309-6535 ISSN: 1684-2782

Article Original

Évaluation des Interactions Sol - Eau et de Leur Contribution Potentielle À l'Acidité des Eaux de Consommation dans la Préfecture de Kindia, République de Guinée

Assessment of Soil-Water Interactions and Their Potential Contribution to Drinking Water Acidity in the Prefecture of Kindia, Republic of Guinea

Amadou Sylla[1,2], Sâa Gérard Tolno[1,2], Fatoumata Bah[1,5], Mohamed Kadiatou Sylla[1,4], Nènè Adama Sow[3], Ismaël Ngnie Teta[1,3], Sidikiba Sidibé[4]

https://doi.org/10.67260/hsd.v27i11.7946

Affiliations
1. Laboratoire de l'Office National de Contrôle de Qualité (ONCQ), Matoto, République de Guinée
2. Laboratoire de Chimie, Institut Supérieur de Technologie (IST) de Mamou, République de Guinée
3. Université Toumaï, N'Djamena, Tchad
4. École Doctorale de la Santé, des Sciences Naturelles, de l'Environnement et du Changement Climatique (ED-SNEC), Université Gamal Abdel Nasser de Conakry (UGANC), République de Guinée
5. Laboratoire de Technologie Alimentaire, École Supérieure de Tourisme et de l'Hôtellerie (ESTH), République de Guinée

Auteur Correspondant
Amadou Sylla, Nutrition–Santé
Contact : (+224) 622 14 67 22
E-mail : amadousylla2505@gmail.com

Mots clés : : acidité des eaux ; interactions sol–eau ; paramètres physicochimiques ; Guinée ; santé publique ; aluminium ; conductivité ; corrélations.
Key Words: Water acidity; Soil–water interactions; Physicochemical parameters; Guinea; Public health; Aluminum; Conductivity; Correlations
Article history
Submitted: 10 September 2026
Revisions requested: 8 October 2026
Accepted: 25 October 2026
Published: 29 October 2026

RÉSUMÉ

Introduction. L'acidité des eaux de consommation constitue un enjeu émergent de santé publique en Guinée. Dans la préfecture de Kindia, les eaux issues des forages et des unités de conditionnement sont exposées aux interactions avec des sols naturellement acides, susceptibles d'influencer leurs caractéristiques physicochimiques et leur qualité sanitaire. L'Objectif restant d'Évaluer les caractéristiques physicochimiques des eaux de consommation et des sols associés, ainsi que les interactions sol–eau susceptibles de contribuer à l'acidité des ressources hydriques dans la préfecture de Kindia. **Méthodes.** Une étude descriptive et analytique transversale a été réalisée sur 605 échantillons, dont 325 échantillons d'eaux de consommation et 280 échantillons de sols associés aux forages, collectés entre 2024 et 2025. Les analyses ont porté sur les paramètres physicochimiques des eaux (pH, conductivité électrique, TDS, alcalinité, ions majeurs et métaux) et sur les propriétés pédologiques des sols (pH KCl, acidité échangeable, capacité d'échange cationique, matière organique et éléments minéraux échangeables). Les interactions sol–eau ont été évaluées par des analyses de corrélation de Pearson et de régression multiple. Les analyses statistiques ont été réalisées avec un seuil de significativité fixé à $p < 0,05$. **Résultats.** Les eaux présentaient une acidité persistante avec un pH moyen compris entre 5,77 et 5,89 selon les périodes, avec des variations significatives selon les saisons ($p = 0,032$) et les types de sources ($p = 0,041$). Les sols étaient également acides (pH KCl = 5,20 ± 0,12) avec une acidité échangeable élevée (1,25 ± 0,30 cmol(+) /kg). Le pH du sol était positivement corrélé au pH de l'eau ($r = +0,62$; $p < 0,01$), tandis que l'acidité échangeable présentait une corrélation négative avec le pH de l'eau ($r = –0,58$; $p < 0,01$). La régression multiple confirmait l'influence du pH du sol ($\beta = +0,58$) et de l'acidité échangeable ($\beta = –0,52$) sur le pH de l'eau. **Conclusion.** L'acidité des eaux de consommation dans la préfecture de Kindia est associée aux caractéristiques pédologiques locales. Ces résultats soulignent l'importance d'une surveillance intégrée sol–eau afin d'améliorer la gestion durable des ressources hydriques et de prévenir les risques sanitaires liés à la mobilisation des éléments métalliques.

ABSTRACT

Introduction. Drinking water acidity driven by naturally acidic soils is an emerging public health concern in Kindia, Guinea. This study evaluated the physicochemical properties of drinking water and associated soils to determine their interactions and contribution to water acidity. **Methods.** A cross-sectional descriptive and analytical study was conducted on 605 samples—including 325 drinking water samples and 280 soil samples associated with boreholes—collected between 2024 and 2025. Analyses focused on water physicochemical parameters (pH, electrical conductivity, TDS, alkalinity, major ions, and metals) and soil pedological properties (KCl pH, exchangeable acidity, cation exchange capacity, organic matter, and exchangeable mineral elements). Soil–water interactions were assessed using Pearson correlation analyses and multiple regression. Statistical analyses were performed with a significance threshold set at $p < 0.05$. **Results.** Waters exhibited persistent acidity with a mean pH ranging from 5.77 to 5.89 across periods, showing significant variations according to seasons ($p = 0.032$) and source types ($p = 0.041$). Soils were also acidic (KCl pH = 5.20 ± 0.12) with high exchangeable acidity (1.25 ± 0.30 cmol(+)/kg). Soil pH was positively correlated with water pH ($r = +0.62$; $p < 0.01$), whereas exchangeable acidity showed a negative correlation with water pH ($r = -0.58$; $p < 0.01$). Multiple regression confirmed the influence of soil pH ($\beta = +0.58$) and exchangeable acidity ($\beta = -0.52$) on water pH. **Conclusion.** Drinking water acidity in the prefecture of Kindia is associated with local pedological characteristics. These findings highlight the importance of integrated soil–water monitoring to improve sustainable water resource management and prevent health risks related to metal mobilization.

Copyright©2026: The Authors. This is an open access article published by HSD under the CC BY NC ND 4.0 license

POUR LES LECTEURS PRESSÉS

Ce qui est connu du sujet. En Guinée, l'interaction entre les sols naturellement acides de Kindia et les eaux de consommation constitue un enjeu sanitaire et physicochimique émergent.

L'aspect du sujet abordé dans cette étude. Réalisée à partir de 605 échantillons (325 d'eau et 280 de sol) collectés entre 2024 et 2025, cette étude descriptive et transversale visait à évaluer les caractéristiques physicochimiques des ressources et leurs interactions sol-eau à Kindia.

Ce que cette étude apporte de nouveau. Marquée par une acidité persistante des eaux (pH moyen de 5,77 à 5,89) et des sols corrélés significativement aux paramètres pédologiques locaux, l'étude démontre l'influence directe du pH du sol ($\beta = +0{,}58$) et de l'acidité échangeable ($\beta = -0{,}52$) sur la qualité des ressources hydriques à Kindia.

Les implications pour la pratique. Une surveillance intégrée sol-eau est essentielle pour gérer durablement les ressources hydriques de Kindia et prévenir les risques sanitaires liés à l'acidité et aux métaux lourds.

INTRODUCTION

La qualité des eaux de consommation constitue un enjeu majeur de santé publique, en particulier dans les pays à revenu faible et intermédiaire où les systèmes d'approvisionnement, de traitement et de surveillance restent encore insuffisamment développés. Selon les estimations conjointes de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) et de l'UNICEF, une proportion importante de la population mondiale demeure exposée à des risques sanitaires liés à l'absence d'accès à une eau potable gérée en toute sécurité, avec des conséquences importantes sur les maladies hydriques, la nutrition et le développement humain [1].

L'acidité des eaux constitue un paramètre physicochimique important dans l'évaluation de leur qualité, car elle influence la corrosivité, la dissolution des métaux présents dans les réseaux de distribution et la mobilité des éléments chimiques naturellement présents dans les sols et les aquifères [2]. La migration des contaminants chimiques depuis les sols vers les eaux souterraines est un phénomène bien documenté, notamment pour des éléments tels que l'arsenic, dont le comportement géochimique illustre l'importance des interactions sol–eau dans la contamination des ressources hydriques [3]. Les eaux présentant un faible pH peuvent favoriser la libération d'éléments métalliques tels que l'aluminium, le fer et le manganèse, susceptibles d'augmenter l'exposition chronique des populations lorsque les concentrations dépassent les valeurs guides recommandées [2,8,9].

En République de Guinée, les ressources en eau souterraine représentent une source essentielle d'approvisionnement pour les populations urbaines, périurbaines et rurales. Toutefois, plusieurs facteurs environnementaux, notamment la nature géologique des terrains, les caractéristiques pédologiques, les activités agricoles et les modifications de l'occupation des sols, peuvent influencer la qualité physicochimique des eaux destinées à la consommation humaine [4,5].

La préfecture de Kindia, historiquement reconnue comme une importante zone agricole, connaît depuis plusieurs années une transformation rapide de son occupation des sols. De nombreux anciens espaces agricoles ont progressivement été convertis en zones d'habitation ou en sites d'installation d'unités de production d'eau conditionnée. Ces changements peuvent modifier les interactions entre les sols et les eaux souterraines, notamment dans les zones caractérisées par des sols naturellement acides et soumis à des phénomènes de lessivage importants.

Dans ce contexte, l'Office National de Contrôle de Qualité (ONCQ), établissement public chargé du contrôle de la qualité des produits alimentaires et non alimentaires aux stades de la production, de la transformation, de l'importation et de l'exportation, assure également des missions de surveillance, d'inspection et d'évaluation des risques sanitaires liés aux produits soumis à son contrôle, incluant les eaux destinées à la consommation humaine [40].

Les sols tropicaux fortement altérés peuvent présenter une acidité élevée, une faible saturation en bases et une capacité limitée de neutralisation, favorisant ainsi la mobilisation des ions métalliques et leur transfert potentiel vers les eaux souterraines. Dans les environnements tropicaux humides, les processus de lixiviation liés aux précipitations peuvent accentuer la migration des éléments dissous et modifier la composition chimique des eaux de forage [18,19,30].

Les effets sanitaires associés à l'exposition chronique à certains contaminants chimiques présents dans les eaux sont largement documentés. L'aluminium a été associé à des effets neurotoxiques potentiels lors d'expositions élevées ou prolongées [8]. Le manganèse, bien qu'étant un élément essentiel à faible concentration, peut provoquer des effets neurologiques en cas d'exposition excessive, notamment chez les populations sensibles [9,13]. Par ailleurs, la présence de nitrates et de nitrites dans les eaux de consommation constitue une préoccupation sanitaire en raison du risque de méthémoglobinémie, particulièrement chez les nourrissons [10,11].

Les recommandations internationales de l'OMS relatives à la qualité des eaux de consommation soulignent l'importance du suivi des paramètres physicochimiques, notamment le pH, la conductivité électrique, les éléments minéraux et les contaminants chimiques, afin de garantir la sécurité sanitaire des populations [2]. Les interactions entre les sols, les eaux souterraines et les activités humaines s'inscrivent également dans une approche intégrée de type « One Health », considérant les liens entre santé humaine, environnement et gestion durable des ressources naturelles.

Malgré l'importance de ces enjeux, les données scientifiques disponibles en Guinée concernant les interactions sol–eau et leur contribution potentielle à l'acidité des eaux de consommation restent limitées. À notre connaissance, aucune étude antérieure en République de Guinée et en particulier dans la préfecture de Kindia n'a évalué simultanément les caractéristiques physicochimiques des eaux, les propriétés pédologiques

Copyright©2026: The Authors. This is an open access article published by HSD under the CC BY NC ND 4.0 license

des sols associés aux forages et les relations statistiques entre ces paramètres.

L'objectif de cette étude était donc d'évaluer les caractéristiques physicochimiques des eaux de consommation et des sols associés aux forages, d'analyser les interactions sol–eau susceptibles de contribuer à l'acidité des ressources hydriques, et de fournir des données scientifiques utiles pour orienter les stratégies de surveillance et de gestion durable de la qualité des eaux en République de Guinée.

MÉTHODOLOGIE

Type et durée de l'étude

Il s'agit d'une étude observationnelle descriptive et analytique à approche transversale répétée, portant sur l'évaluation intégrée de la qualité physicochimique des eaux de consommation et des caractéristiques pédologiques des sols associés aux points de forage dans la préfecture de Kindia (République de Guinée).

L'étude s'inscrit dans une approche One Health, visant à analyser les interactions entre les facteurs environnementaux (propriétés des sols), les caractéristiques physicochimiques des ressources hydriques et leurs implications potentielles pour la qualité sanitaire des eaux destinées à la consommation humaine. Elle a été réalisée sur une période de 24 mois, du 1er janvier 2024 au 31 décembre 2025, couvrant deux cycles saisonniers comprenant les saisons sèches et pluvieuses.

Échantillons et plan d'échantillonnage

Les prélèvements ont été réalisés par les inspecteurs de l'Office National de Contrôle de Qualité (ONCQ), organisme national chargé du contrôle et de la surveillance de la qualité des produits soumis à son contrôle, conformément à ses missions réglementaires définies par le Décret D/2023/004/PRG/CNRD/SGG du 6 janvier 2023 portant attributions, organisation et fonctionnement de l'ONCQ [40].

Les sites d'échantillonnage étaient répartis dans les zones urbaines, périurbaines et rurales de la préfecture de Kindia afin de couvrir les principales sources d'approvisionnement en eau utilisées par les populations. Les campagnes de prélèvement ont été réalisées trimestriellement, permettant d'obtenir une représentation des variations saisonnières sur les deux années d'étude.

Les informations relatives à chaque prélèvement (type de source, localisation, date, saison, conditions environnementales) ont été enregistrées dans une base de données assurant la traçabilité complète des échantillons.

- **Types de sources et répartition des échantillons**

Un total de 325 échantillons d'eau a été collecté pour des fins d'analyses en laboratoire. Les sources étudiées comprenaient (les forages domestiques urbains, les forages domestiques ruraux, les forages utilisés par les unités de production d'eau conditionnée et les eaux commercialisées sous forme de sachets et bouteilles PET).

La répartition des 325 échantillons d'eau était la suivante :

- 235 échantillons provenant des forages domestiques urbains et ruraux ;
- 45 échantillons provenant des forages des unités de production d'eau ;
- 45 échantillons provenant des eaux commercialisées (sachets et bouteilles PET).

Chaque échantillon correspondait à une unité de prélèvement indépendante de ces points d'eaux. La stratégie d'échantillonnage a été conçue afin d'intégrer deux (02) dimensions principales :

- La variabilité spatiale liée aux différents types de sources ;
- La variabilité temporelle liée aux saisons sèche et pluvieuse.

- **Procédure de prélèvement et transport**

Les prélèvements d'eau ont été réalisés conformément à la norme ISO 5667 3:2018 [20] et aux méthodes standardisées [24]. Chaque prélèvement a été effectué dans un flacon propre et approprié d'une capacité de 500 mL. Les contenants ont été immédiatement fermés après collecte, identifiés par un code unique et enregistrés dans la fiche de traçabilité.

Les échantillons ont été transportés dans des glacières isothermes protégées de la lumière et maintenues à une température adaptée aux analyses prévues. Les analyses ont été réalisées dans un délai maximal de 24 heures après prélèvement afin de limiter les modifications physicochimiques susceptibles d'affecter les résultats.

- **Échantillonnage des sols**

Les prélèvements de sols ont été réalisés au niveau des mêmes sites que les forages étudiés afin d'évaluer les relations potentielles entre les caractéristiques pédologiques et la qualité physicochimique des eaux. Pour chaque point d'eau, un échantillon composite de sol a été prélevé dans l'horizon superficiel (0 – 20 cm), correspondant à la zone où se produisent principalement les processus d'échange ionique, d'altération minérale et de lixiviation.

Au total, 280 échantillons de sols ont été collectés :

- 235 échantillons associés aux forages domestiques urbains et ruraux ;
- 45 échantillons associés aux forages des unités de production d'eau.

Les prélèvements ont été réalisés conformément aux méthodes recommandées pour l'analyse des sols afin d'éviter les contaminations croisées [23,24].

Après la collecte, les sols ont été homogénéisés, conditionnés dans des sachets propres hermétiques, étiquetés puis transportés au laboratoire.

Avant analyse, les échantillons ont été séchés à l'air libre dans des conditions contrôlées, désagrégés puis tamisés conformément aux protocoles analytiques utilisés pour les analyses pédologiques.

Copyright©2026: The Authors. This is an open access article published by HSD under the CC BY NC ND 4.0 license

Figure 1 : Carte des zones de prélèvement des sols et des eaux

Analyses physico chimiques des eaux

Les analyses physicochimiques des eaux ont été réalisées en appliquant des méthodes normalisées reconnues au niveau international, conformément aux recommandations de l'OMS et aux normes ISO, ainsi qu'aux méthodes standards d'analyse des eaux [2,24], afin de garantir une conformité méthodologique aux standards internationaux. Les limites de détection (LOD) et de quantification (LOQ) ont été déterminées pour chaque paramètre en respectant les exigences de l'ISO 17025, assurant la fiabilité et la traçabilité des résultats.

Les paramètres étudiés comprenaient le pH, la conductivité électrique, les solides dissous totaux (TDS), l'alcalinité totale, les ions majeurs (calcium et magnésium), les métaux dissous (aluminium, fer, manganèse), ainsi que les nitrites et nitrates. Les résultats présentés dans les tableaux correspondent aux moyennes des analyses réalisées à chaque trimestre, conformément à la fréquence de prélèvement adoptée. Le pH des eaux a été mesuré selon la norme ISO 10523 :2008 [21], tandis que la conductivité électrique a été déterminée conformément à la norme ISO 7888 :1985 [16]. Les concentrations en calcium et magnésium ont été analysées suivant la norme ISO 7980 :1986 [17], spécifiquement dédiée à la détermination de ces ions. Les nitrites et nitrates ont été quantifiés en se basant sur les documents techniques de l'OMS relatifs à la qualité des eaux de consommation [2,14], en cohérence avec les valeurs guides internationales. Les métaux dissous, notamment l'aluminium, le fer et le manganèse, ont été déterminés par spectrométrie d'absorption atomique (AAS), en appliquant les méthodes analytiques de référence décrites dans les normes et ouvrages spécialisés [17,24].

- **Paramètres analysés et normes de référence**

Le pH a été mesuré selon la norme ISO 10523 :2008 [21], tandis que la conductivité électrique a été déterminée suivant la norme ISO 7888 :1985 [16]. Les solides dissous totaux (TDS) ont été quantifiés selon les méthodes normalisées décrites dans les Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater [24]. L'alcalinité totale a été évaluée par titrimétrie conformément aux procédures analytiques recommandées pour l'analyse des eaux [24].

Les concentrations en calcium et magnésium ont été déterminées par titrage complexométrique à l'acide éthylène diamine tétra-acétique (EDTA), conformément aux méthodes normalisées d'analyse des eaux [24].

L'ISO 7980 :1986 a été utilisée uniquement pour le calcium et le magnésium, dans la mesure où cette norme ne couvre pas le sodium et le potassium [17]. Les teneurs en aluminium, fer et manganèse ont été déterminées par spectrométrie d'absorption atomique (AAS) selon les méthodes décrites dans les protocoles analytiques internationaux [17,24].

Les nitrites et nitrates ont été analysés conformément aux recommandations techniques de l'OMS relatives à la qualité des eaux de consommation [2,14]. Les résultats ont été exprimés en mg/L, µS/cm et unités pH conformément aux recommandations de l'OMS [2].

Analyses pédologiques des sols

Les analyses pédologiques ont été réalisées sur les sols associés aux points d'eau afin de caractériser les propriétés physicochimiques susceptibles d'influencer l'acidité des eaux et la mobilité des éléments minéraux. Le pH des sols a été déterminé selon la norme ISO 10390 :2021 relatives à la détermination du pH des sols, des biodéchets traités et des boues [18].

L'acidité échangeable ($H^+ + Al^{3+}$) a été évaluée conformément à la norme ISO 14254 :2018 relative à la détermination de l'acidité échangeable des sols [19]. La capacité d'échange cationique (CEC), qui représente la capacité du sol à retenir les ions échangeables, a été

Copyright©2026: The Authors. This is an open access article published by HSD under the CC BY NC ND 4.0 license

déterminée selon les méthodes normalisées d'analyse des sols décrites dans les ouvrages de référence en science du sol [22,23].

La matière organique a été évaluée par la méthode de Walkley-Black conformément aux méthodes classiques d'analyse chimique des sols décrites par le Soil Science Society of America [23].

Les éléments minéraux échangeables (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}, Na^{+}), ainsi que le fer total et le manganèse total, ont été quantifiés selon les méthodes analytiques de référence appliquées aux analyses pédologiques [22,23]. Les résultats ont été exprimés en cmol(+) /kg, %, mg/kg et µS/cm selon les paramètres analysés.

Analyses des interactions sol–eau

L'évaluation des interactions sol–eau a été réalisée à l'aide de coefficients de corrélation de Pearson. Cette méthode a permis d'examiner les relations entre le pH du sol et le pH de l'eau, entre l'acidité échangeable et l'acidité des eaux, entre les minéraux échangeables et les ions dissous, ainsi qu'entre la CEC et la conductivité électrique des eaux. L'ensemble des analyses a été conduit avec le logiciel R, selon les modalités décrites en section 2.8. Les coefficients de corrélation (r) et les valeurs de p sont rapportés dans la section Résultats.

Assurance qualité analytique

L'assurance qualité des analyses a été assurée par l'application rigoureuse des normes ISO et des méthodes standardisées d'analyse des eaux [17,24]. Les méthodes ont été validées par la détermination des LOD et LOQ. Des contrôles internes ont été systématiquement intégrés : étalonnages quotidiens, blancs analytiques, duplicatas et étalons certifiés. Des essais inter laboratoires ont été réalisés avec trois institutions partenaires en Guinée afin de vérifier la reproductibilité des mesures et la conformité aux standards internationaux. Les étalonnages quotidiens, les blancs analytiques, les duplicatas, les étalons certifiés et les essais inter laboratoires ont été systématiquement réalisés. Le laboratoire applique les exigences de l'ISO 17025 pour la validation des méthodes.

Analyse statistique

Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R version 4.5.1. La normalité des distributions a été évaluée par le test de Shapiro-Wilk [26], tandis que l'homogénéité des variances a été vérifiée par le test de Levene. Les comparaisons entre deux groupes indépendants ont été effectuées à l'aide du test t de Student lorsque les conditions d'application étaient respectées, ou du test de Mann-Whitney dans le cas contraire. Les comparaisons entre plusieurs groupes ont été réalisées par une analyse de variance (ANOVA), suivie du test post hoc de Tukey pour identifier les différences significatives entre groupes [27, 28].

Les variables qualitatives ont été analysées par le test du Chi^2 de Pearson ou le test exact de Fisher lorsque les effectifs attendus étaient insuffisants. Le seuil de significativité statistique a été fixé à $p < 0,05$. Les résultats ont été exprimés sous forme de moyenne ± écart-type, conformément aux pratiques statistiques utilisées dans les études environnementales quantitatives.

RÉSULTATS

Résultats en rapport avec les échantillons d'eaux

Tableau I : Répartition des échantillons d'eaux de consommation et des sols associés aux points de forage dans la préfecture de Kindia entre 2024 et 2025 (n = 605).

Type d'échantillon	Nbre	Année 2024		Année 2025	
		Saison sèche	Saison pluvieuse	Saison sèche	Saison pluvieuse
Eaux de forage brut (urbains + ruraux)	235	60	58	60	57
Eaux des forages des unités de production	45	12	11	11	11
Eaux commercialisées (sachets + PET)	45	12	11	11	11
Total échantillons d'eaux	325	84	80	82	79
Sols associés aux forages bruts (urbains + ruraux)	235	60	58	60	57
Sols associés aux forages des unités de production	45	12	11	11	11
Total échantillons de sols associés	280	72	69	71	68
Total général	605	156	149	153	147

Ce tableau présente la répartition des 605 échantillons collectés, comprenant 325 échantillons d'eaux de consommation et 280 échantillons de sols associés aux points de forage dans la préfecture de Kindia au cours des années 2024 et 2025.

Les eaux de forage brutes constituaient la majorité des prélèvements (235 échantillons), répartis entre les forages domestiques urbains et ruraux, reflétant leur importance dans l'approvisionnement en eau des populations. Les eaux provenant des forages des unités de production représentaient 45 échantillons, correspondant aux points de captage utilisés par les structures locales de conditionnement d'eau. Les eaux commercialisées, comprenant les eaux conditionnées en sachets et en bouteilles PET, représentaient également 45 échantillons, permettant d'évaluer la qualité physicochimique des eaux après conditionnement. Les sols associés aux forages ont été prélevés sur les mêmes sites que les points d'eau étudiés afin d'analyser les relations potentielles entre les

Copyright©2026: The Authors. This is an open access article published by HSD under the CC BY NC ND 4.0 license

caractéristiques pédologiques et la composition physicochimique des eaux.

Au total, 280 échantillons de sols ont été analysés, dont 235 associés aux forages domestiques urbains et ruraux et 45 associés aux forages des unités de production d'eau potable. Cette organisation de l'échantillonnage a permis d'intégrer les variations saisonnières entre périodes sèches et pluvieuses durant les deux années d'étude.

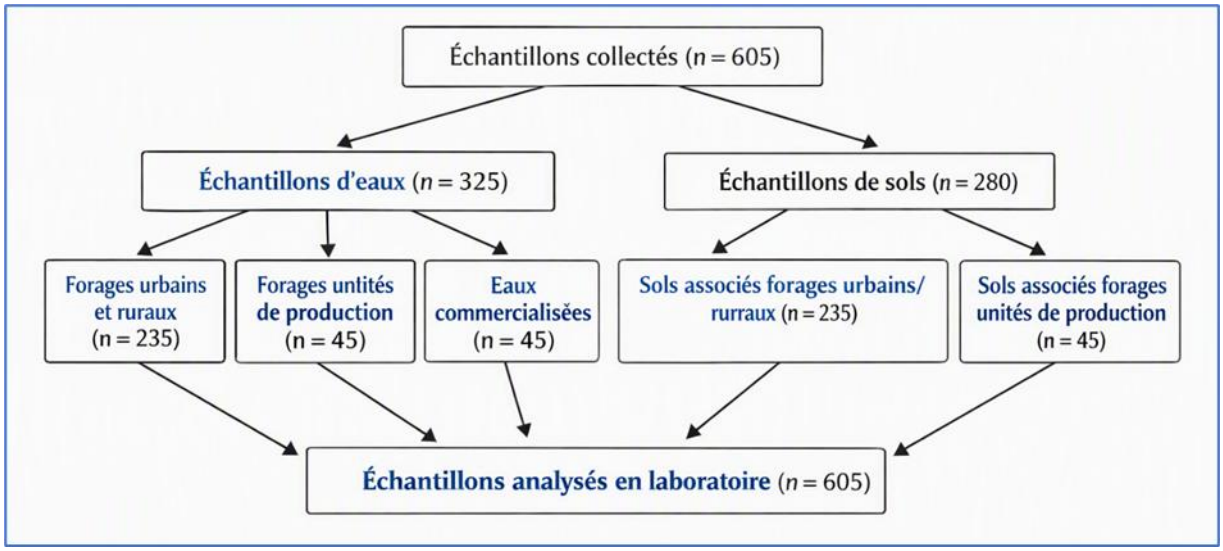

Figure 1 : Diagramme de flux des échantillons collectés et analysés dans la préfecture de Kindia (Guinée)

Ce schéma illustre la répartition des 605 échantillons collectés entre les eaux (n = 325) et les sols (n = 280), ainsi que leurs sous catégories : forages urbains et ruraux, unités de production et eaux commercialisées. Tous les échantillons ont été analysés en laboratoire selon les protocoles de contrôle qualité de l'ONCQ.

Tableau II : variation des paramètres des eaux selon l'année et la saison (n = 325)

Paramètres	Unités	Année 2024		Année 2025		p-value
		Saison sèche (n=84)	Saison pluvieuse (n=80)	Saison sèche (n=82)	Saison pluvieuse (n=79)	
pH	-	5,80	5,89	5,77	5,85	0,032
Conductivité	µS/cm	19,04	25,93	17,22	28,47	0,004
TDS	mg/L	25,99	32,66	23,50	36,86	0,006
Alcalinité totale	mg/L $CaCO_3$	34,22	34,98	34,51	34,86	0,118
Calcium (Ca^{2+})	mg/L	10,01	10,06	10,01	10,22	0,142
Magnésium (Mg^{2+})	mg/L	18,70	18,90	18,01	18,43	0,085
Aluminium (Al^{3+})	mg/L	0,90	0,92	0,088	0,93	0,021
Fer (Fe^{2+}/Fe^{3+})	mg/L	0,64	0,60	0,62	0,61	0,164
Nitrites (NO_2^-)	mg/L	0,27	0,31	0,34	0,32	0,037
Nitrates (NO_3^-)	mg/L	21,00	21,05	21,03	21,06	0,212
Manganèse (Mn^{2+})	mg/L	0,37	0,33	0,31	0,28	0,029

Note : TDS = solides dissous totaux.

Le pH moyen variait de 5,77 à 5,89 entre les quatre périodes (p = 0,032). La conductivité variait de 17,22 à 28,47 µS/cm (p = 0,004) et les TDS de 23,50 à 36,86 mg/L (p = 0,006), avec des valeurs plus élevées pendant les saisons pluvieuses. L'aluminium variait de 0,88 à 0,93 mg/L (p = 0,021), les nitrites de 0,27 à 0,34 mg/L (p = 0,037) et le manganèse de 0,28 à 0,37 mg/L (p = 0,029) présentent également des hausses suggérant une contribution des sols lessivés. Les nitrates, voisins de 21 mg/L, restaient stables (p = 0,212) et inférieurs à la valeur guide de l'OMS de 50 mg/L [2].

Copyright©2026: The Authors. This is an open access article published by HSD under the CC BY NC ND 4.0 license

Tableau III : paramètres des eaux selon le type de source (n = 325)

Paramètres	Unité	Forages urbains (n = 120)	Forages ruraux (n = 115)	Forages unités de production (n = 45)	Eaux commercialisées (n = 45)	p-value
pH	-	6,09	6,11	6,03	5,67	0,041
Conductivité	µS/cm	9,00	19,00	13,00	20,00	0,008
TDS	mg/L	12,28	25,93	17,74	27,30	0,011
Alcalinité totale	mg/L $CaCO_3$	30,22	30,01	30,14	30,27	0,134
Calcium (Ca^{2+})	mg/L	9,17	9,19	10,03	9,97	0,097
Magnésium (Mg^{2+})	mg/L	17,09	17,07	17,07	17,01	0,121
Aluminium (Al^{3+})	mg/L	0,98	0,86	0,83	0,77	0,022
Fer (Fe^{2+}/Fe^{3+})	mg/L	0,61	0,63	0,60	0,57	0,156
Nitrites (NO_2^-)	mg/L	0,29	0,27	0,26	0,20	0,039
Nitrates (NO_3^-)	mg/L	21,01	21,30	21,70	21,04	0,141
Manganèse (Mn^{2+})	mg/L	0,37	0,33	0,35	0,31	0,027

Note : TDS = solides dissous totaux.

Les résultats de ce tableau en rapport avec l'analyse par type de source confirment que les eaux conditionnées sont les plus acides. Le pH moyen le plus faible était observé dans les eaux commercialisées (5,67); il était de 6,09 dans les forages urbains et de 6,11 dans les forages ruraux (p = 0,041). La conductivité et les TDS différaient également selon le type de source (p = 0,008 et p = 0,011, respectivement). Les différences de conductivité et de TDS indiquent une variabilité liée aux conditions de captage et de traitement.

Résultats en rapport avec les échantillons des sols associés aux points d'eaux

Tableau IV : caractéristiques physico-chimiques des sols associés aux points d'eau (n = 280)

Paramètres	Unités	Moyenne ± Écart-type	Minimum	Maximum
pH de l'eau	-	5,89 ± 0,15	5,67	6,11
pH KCl	-	5,20 ± 0,12	5,05	5,40
Acidité échangeable (H^++Al^{3+})	cmol(+)/kg	1,25 ± 0,30	0,90	1,80
Al^{3+} échangeable	cmol(+)/kg	0,45 ± 0,10	0,30	0,60
CEC	cmol(+)/kg	12,5 ± 2,1	10,0	15,0
Saturation en bases	%	45 ± 5	40	55
Conductivité électrique	µS/cm	35 ± 8	25	48
Matière organique	%	3,2 ± 0,5	2,5	4,0
Carbone organique total	%	1,85 ± 0,30	1,50	2,20
Azote total	%	0,18 ± 0,05	0,12	0,25
Rapport C/N	-	10,3 ± 1,2	9	12
Phosphore assimilable	mg/kg	25 ± 6	18	32

Note : CEC = capacité d'échange cationique; C/N = rapport carbone/azote

Le pH KCl moyen des sols était de 5,20 ± 0,12 et l'acidité échangeable de 1,25 ± 0,30 cmol(+)/kg. La saturation en bases était de 45 ± 5 %, la CEC de 12,5 ± 2,1 cmol(+)/kg et la matière organique de 3,2 ± 0,5 %. Ces caractéristiques traduisent une tendance naturelle à l'acidification des eaux infiltrées. La conductivité électrique de 35 ± 8 µS/cm et la teneur en matière organique de 3,2 ± 0,5 % restent modérées, mais suffisantes pour influencer la mobilité des ions.

Tableau V : Composition minérale des sols (n = 280)

Paramètres	Unité	Moyenne ± Écart-type	Minimum	Maximum
Ca^{2+} échangeable	cmol(+)/kg	3,2 ± 0,6	2,5	4,0
Mg^{2+} échangeable	cmol(+)/kg	2,1 ± 0,4	1,5	2,8
K^+ échangeable	cmol(+)/kg	0,45 ± 0,10	0,30	0,60
Na^+ échangeable	cmol(+)/kg	0,30 ± 0,08	0,20	0,45
Fer total du sol	mg/kg	35 ± 7	28	45
Manganèse du sol	mg/kg	12 ± 3	8	16
Saturation calcique	%	25 ± 4	20	30

Note : CEC = capacité d'échange cationique

Les teneurs moyennes en calcium et magnésium échangeables étaient de 3,2 ± 0,6 et 2,1 ± 0,4 cmol(+)/kg. Le fer total et le manganèse du sol étaient respectivement de 35 ± 7 et 12 ± 3 mg/kg. La composition minérale des sols étudiés montre une dominance du calcium et du magnésium échangeables, mais avec une saturation calcique limitée soit 25%. La présence de fer total de 35 mg/kg et de manganèse de 12 mg/kg suggère un potentiel de libération de métaux dans les eaux, particulièrement en conditions acides.

Copyright©2026: The Authors. This is an open access article published by HSD under the CC BY NC ND 4.0 license

Résultats en rapport avec les interactions sol-eau

Tableau VI : Corrélations entre paramètres du sol et de l'eau (n = 280)

Paramètres du sol	Paramètres de l'eau associés	Coefficient de corrélation (r)	p-value
pH du sol	pH de l'eau	+0,62	<0,01
Acidité échangeable du sol	pH de l'eau	-0,58	<0,01
Aluminium échangeable du sol	Aluminium de l'eau	+0,55	<0,05
Calcium du sol	Calcium de l'eau	+0,49	<0,05
Magnésium du sol	Magnésium de l'eau	+0,46	<0,05
Matière organique du sol	pH de l'eau	+0,40	<0,05
CEC du sol	Conductivité de l'eau	+0,52	<0,01

Note : CEC = capacité d'échange cationique

Le pH du sol était positivement corrélé au pH de l'eau ($r = 0,62$; $p < 0,01$), tandis que l'acidité échangeable du sol lui était négativement corrélée ($r = -0,58$; $p < 0,01$). Des corrélations positives étaient aussi rapportées entre les teneurs du sol et de l'eau pour l'aluminium, le calcium et le magnésium ($r = 0,46$ à $0,55$; $p < 0,05$), ainsi qu'entre la CEC du sol et la conductivité de l'eau ($r = 0,52$; $p < 0,01$). Dans le modèle de régression linéaire multiple, le pH de l'eau est significativement influencé par le pH du sol ($\beta = +0,58$; $p < 0,01$) et par l'acidité échangeable ($\beta = –0,52$; $p < 0,01$). Ces résultats confirment la contribution des caractéristiques pédologiques locales à l'acidité des eaux de consommation.

DISCUSSION

Profil des sources d'eau et dynamique d'approvisionnement

Les résultats montrent que l'approvisionnement en eau de consommation dans la préfecture de Kindia repose principalement sur les forages domestiques urbains, périurbains et villageois, ainsi que sur les eaux conditionnées. Cette configuration est similaire à celle observée dans plusieurs pays d'Afrique subsaharienne, où les forages constituent la principale source d'eau potable en milieu rural et périurbain [30,33].

Des études récentes menées au Ghana et au Cameroun ont également montré que les eaux conditionnées présentent une variabilité importante de qualité selon les procédés de traitement et les matériaux de conditionnement [30,33]. Nos résultats confirment cette tendance, les eaux conditionnées étant les plus acides (pH = 5,67), ce qui pourrait être lié à la qualité de l'eau utilisée pour le conditionnement ou à la nature des emballages PET.

Qualité physico chimique des eaux et influence saisonnière

Les variations saisonnières observées mettent en évidence une acidité persistante des eaux, avec un pH moyen compris entre 5,77 et 5,89 selon les périodes, et de 5,67 pour les eaux commercialisées, soit en dessous de la plage de 6,5 à 8,5 généralement admise pour l'eau de boisson. Ce phénomène est cohérent avec les observations réalisées en Sierra Leone et au Liberia, où les pluies intenses favorisent la lixiviation des sols et la migration des ions acides vers les nappes [38].

La conductivité et les TDS augmentent significativement en saison pluvieuse ($p < 0,01$), traduisant une mobilisation accrue des minéraux. Des tendances similaires ont été rapportées au Nigeria, où la saison humide augmente la charge ionique des eaux souterraines en raison du ruissellement et de l'infiltration des eaux de surface [38]. L'augmentation de l'aluminium et des nitrites confirme l'impact du lessivage des sols. Plusieurs études récentes ont démontré que les sols acides tropicaux favorisent la solubilisation des métaux, notamment Al^{3+} et Mn^{2+}, en conditions pluvieuses [31,32].

Propriétés pédologiques et influence sur la qualité des eaux

Les sols associés aux points d'eau présentent un pH KCl acide, une acidité échangeable élevée et une saturation en bases faible. Ces caractéristiques sont typiques des sols ferrallitiques tropicaux, comme rapporté en Côte d'Ivoire et au Mali [30,31].

La CEC relativement faible indique une capacité limitée du sol à retenir les cations, favorisant leur migration vers les eaux. Ce phénomène a été largement documenté dans les environnements tropicaux humides [30,31]. La composition minérale montre une dominance du calcium et du magnésium échangeables, mais une saturation calcique limitée, ce qui réduit la capacité du sol à neutraliser l'acidité. La présence de fer total et de manganèse suggère un potentiel de libération de métaux dans les eaux, particulièrement en conditions acides [32].

Interactions sol - eau : relations mécanistiques

Les corrélations de Pearson mettent en évidence des relations significatives entre les paramètres pédologiques et ceux des eaux. Le pH du sol est positivement corrélé au pH de l'eau ($r = +0,62$; $p < 0,01$), confirmant que les sols acides favorisent la production d'eaux acides, comme démontré dans plusieurs études récentes [33,34,35].

L'acidité échangeable est négativement corrélée au pH de l'eau ($r = –0,58$; $p < 0,01$), traduisant un effet acidifiant marqué. Les corrélations positives entre les teneurs en aluminium, calcium et magnésium du sol et celles de l'eau indiquent une migration des ions échangeables vers les eaux de consommation [33].

Enfin, la CEC du sol est positivement corrélée à la conductivité de l'eau ($r = +0,52$; $p < 0,01$), suggérant que la capacité d'échange du sol contribue à la charge ionique des eaux. Ce phénomène a été décrit dans plusieurs études récentes [33,34,35].

Implications pour la santé publique et la gestion de l'eau

L'acidité persistante des eaux peut favoriser la solubilisation des métaux tels que l'aluminium et le manganèse, dont l'exposition chronique est associée à des risques neurologiques et hématologiques [8,9,13]. Les

Copyright©2026: The Authors. This is an open access article published by HSD under the CC BY NC ND 4.0 license

concentrations élevées en nitrites constituent également un risque pour les nourrissons, en raison du potentiel de méthémoglobinémie [10,11]. Les teneurs moyennes en aluminium (environ 0,9 mg/L) dépassent la valeur pratique de 0,1 à 0,2 mg/L mentionnée dans les recommandations de l'OMS [2], ce qui justifie un suivi particulier de ce métal.

Ces constats plaident pour un renforcement des systèmes de surveillance de la qualité des eaux, en particulier dans les zones rurales où les forages constituent la principale source d'eau potable. Une harmonisation des normes nationales avec les recommandations de l'OMS apparaît nécessaire pour réduire les risques sanitaires [2].

Forces et limites de l'étude

Cette étude constitue la première évaluation intégrée sol–eau réalisée dans la préfecture de Kindia, combinant analyses physicochimiques, analyses pédologiques et analyses statistiques (corrélations de Pearson et régression linéaire multiple). Elle repose sur un nombre important d'échantillons et utilise exclusivement des méthodes normalisées (ISO, OMS, FAO), renforçant la fiabilité des résultats [16 – 24].

Certaines limites doivent toutefois être considérées. Premièrement, l'étude a porté sur des eaux de forage et des eaux conditionnées, sans inclusion d'eaux de surface (cours d'eau, retenues, sources non aménagées), ce qui ne permet pas de comparer la qualité des eaux souterraines et celle des eaux de surface. Deuxièmement, les prélèvements ont été réalisés de façon trimestrielle, sans suivi temporel continu : des variations de courte durée, notamment lors des premières pluies ou des épisodes pluvieux intenses, ont pu ne pas être captées. Troisièmement, aucune évaluation directe des impacts sanitaires sur les populations exposées n'a été réalisée ; les risques évoqués restent donc potentiels et déduits de la comparaison des concentrations avec les valeurs guides. Quatrièmement, l'étude est monocentrique, limitée à la préfecture de Kindia, ce qui restreint la généralisation des résultats à d'autres contextes pédoclimatiques de la Guinée. Enfin, les données relatives aux pratiques de traitement de l'eau à domicile (filtration, décantation, chloration, conditions de stockage) n'ont pas été recueillies, alors qu'elles peuvent modifier la qualité de l'eau effectivement consommée. Par ailleurs, le caractère transversal de l'étude implique que les corrélations observées traduisent des associations statistiques et ne suffisent pas à établir à elles seules une relation de causalité.

Des études complémentaires sont donc nécessaires : (i) inclure les eaux de surface et comparer les différentes ressources ; (ii) mettre en place un suivi mensuel ou continu sur plusieurs cycles hydrologiques ; (iii) évaluer l'exposition et les effets sanitaires chez les populations consommatrices ; (iv) étendre l'étude à plusieurs préfectures et régions naturelles de la Guinée ; (v) documenter les pratiques de traitement et de stockage de l'eau à domicile [30–40].

CONCLUSION

Cette étude montre que les eaux de consommation de la préfecture de Kindia présentent une acidité persistante, influencée par les saisons et les types de sources. Bien que certains paramètres physico chimiques demeurent conformes aux normes de potabilité, les variations observées en saison pluvieuse révèlent une augmentation significative de la conductivité, des taux de sels dissouts de certains ions métalliques, notamment l'aluminium et le manganèse. Les sols associés aux points d'eau se caractérisent par un pH acide, une acidité échangeable élevée et une saturation en bases limitée, confirmant leur rôle déterminant dans la qualité des eaux. Les corrélations établies entre les paramètres pédologiques et ceux des eaux mettent en évidence une migration des ions échangeables et un effet direct de l'acidité des sols sur l'acidité des eaux de consommation. Les résultats, exprimés sous forme de moyenne ± écart type et validés par des tests statistiques appropriés ainsi que par des analyses de corrélation et de régression multiple, renforcent la robustesse scientifique des conclusions. Ces constats soulignent la nécessité de mettre en place des mécanismes de surveillance intégrée sol eau, afin d'anticiper les risques liés à l'acidification des ressources hydriques. Ils fournissent des données de référence utiles pour orienter les politiques locales de sécurité sanitaire et pour améliorer la gestion durable de la qualité des eaux de consommation en Guinée.

DÉCLARATIONS

Conflits d'intérêts

Les auteurs déclarent n'avoir aucun conflit d'intérêts en lien avec la conception, la réalisation, l'analyse ou la publication de cette étude. Ils précisent également que cette recherche n'a bénéficié d'aucun financement spécifique provenant d'organismes publics, privés, commerciaux ou à but non lucratif.

Approbation éthique

Cette étude porte exclusivement sur des échantillons environnementaux (eaux de consommation et sols associés) et n'implique ni participants humains ni animaux. Conformément aux lignes directrices internationales applicables aux recherches environnementales, l'obtention d'une approbation auprès d'un comité d'éthique n'était pas requise. L'étude a été réalisée sous la supervision institutionnelle de l'ONCQ, organisme national chargé du contrôle de la qualité des produits et denrées en République de Guinée. Dans le cadre de ses missions régaliennes, l'ONCQ dispose d'un réseau opérationnel couvrant les 33 préfectures, les 13 communes de Conakry, les postes frontaliers, le Port Autonome de Conakry, l'aéroport international, dans les marchés, les usines et les unités industrielles permettant l'accès aux différents sites de prélèvement et la réalisation des contrôles officiels.

Les prélèvements d'échantillons d'eau et de sols ont été effectués par les services habilités de l'ONCQ, conformément aux procédures internes de contrôle et aux exigences réglementaires nationales en vigueur. L'accès aux sites de prélèvement (forages domestiques, unités de production d'eau et points de commercialisation) a été réalisé dans le cadre des missions officielles de contrôle et de surveillance de la qualité des eaux de consommation.

Copyright©2026: The Authors. This is an open access article published by HSD under the CC BY NC ND 4.0 license

Remerciements

Les auteurs expriment leur profonde gratitude aux institutions et laboratoires dont l'appui scientifique, technique et logistique a été déterminant pour la réalisation de ce travail. Ils remercient le Laboratoire de l'ONCQ, Matoto, République de Guinée, pour son soutien institutionnel constant, la coordination des campagnes de prélèvements et la mise à disposition des équipements analytiques nécessaires à l'évaluation de la qualité des eaux et des sols.

Ils expriment également leur reconnaissance au Laboratoire de Chimie de l'Institut Supérieur de Technologie de Mamou pour son expertise méthodologique, son accompagnement dans les analyses physico chimiques et sa contribution à la validation des protocoles expérimentaux.

Leur gratitude s'étend à l'Université Toumaï de N'Djamena, Tchad, dont l'appui académique, les échanges scientifiques et les contributions méthodologiques ont enrichi l'interprétation des résultats.

Ils saluent l'École Doctorale de la Santé, des Sciences Naturelles, de l'Environnement et du Changement Climatique (ED SNEC) de l'Université Gamal Abdel Nasser de Conakry pour son soutien scientifique, son expertise en santé environnementale et son rôle dans l'intégration de l'approche One Health au sein de cette étude.

Les auteurs remercient également le Laboratoire de Technologie Alimentaire de l'École Supérieure de Tourisme et de l'Hôtellerie (ESTH), République de Guinée, pour l'accès aux infrastructures analytiques, le soutien logistique et la collaboration apportée aux analyses pédologiques et minérales. Enfin, ils expriment leur reconnaissance à l'ensemble des techniciens, ingénieurs et encadreurs ayant participé aux différentes phases de collecte, de préparation et d'analyse des échantillons, dont la rigueur, la disponibilité et le professionnalisme ont été essentiels à la qualité scientifique de ce travail.

Sources de financement

Les auteurs déclarent que cette recherche n'a bénéficié d'aucun soutien financier spécifique. Elle n'a reçu aucun financement dédié de la part d'organismes publics, privés, commerciaux ou à but non lucratif, et a été réalisée exclusivement grâce aux ressources institutionnelles et aux moyens techniques disponibles au sein des laboratoires impliqués.

Contributions des auteurs

Amadou Sylla : Conceptualisation, méthodologie, investigation, coordination des prélèvements, supervision des analyses physico chimiques et pédologiques, rédaction de la version originale du manuscrit (Writing – Original Draft), auteur correspondant.

Sâa Gérard Tolno : Analyse formelle (Formal Analysis), analyse statistique, interprétation des données, révision critique du manuscrit (Writing – Review & Editing).

Ismaël Teta : Revue de la littérature, contribution méthodologique, interprétation des résultats, rédaction de l'introduction et de la discussion, révision scientifique du manuscrit.

Fatoumata Bah : Investigation, analyses de laboratoire, dosage des micronutriments et des contaminants chimiques, collecte des données, validation des résultats, révision de la méthodologie.

Mohamed Kadiatou Sylla : Supervision des analyses physico chimiques, validation des résultats analytiques, interprétation des données, révision de la section Résultats.

Nènè Adama Sow : Participation aux analyses physico chimiques, pédologiques, application des protocoles normalisés ISO, validation des résultats analytiques et contrôle qualité.

Sidikiba Sidibe : Supervision scientifique, conception de l'étude, validation méthodologique, interprétation des résultats, administration du projet, révision critique et édition finale du manuscrit (Supervision, Project Administration, Writing – Review & Editing).

Tous les auteurs ont participé à l'interprétation des résultats, ont relu de manière critique le manuscrit, ont approuvé sa version finale et acceptent d'assumer la responsabilité de l'ensemble du contenu publié.

RÉFÉRENCES

1. WHO & UNICEF. Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000–2022: Special focus on gender. WHO/UNICEF Joint Monitoring Programme (JMP); 2023. https://data.unicef.org/resources/jmp-report-2023/
2. World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first, second and third addenda. Geneva: WHO; 2026. https://www.who.int/publications/i/item/9789240121225
3. Smedley PL, Kinniburgh DG. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. Appl Geochem. 2002;17(5):517–568.
4. Institut National de la Statistique, ICF. Enquête Démographique et de Santé en Guinée 2018. Conakry & Rockville (MD): INS & ICF; 2018.
5. World Health Organization. Strong systems and sound investments: evidence on and key insights into accelerating progress on sanitation, drinking-water and hygiene. UN-Water Global Analysis and Assessment of Sanitation and Drinking-Water (GLAAS) 2022 report. Geneva: WHO; 2022.
6. World Bank. Guinea Water and Sanitation Project (P179017): project appraisal document. Report No. PAD00238. Washington (DC): World Bank; 2025.
7. World Health Organization, United Nations Children's Fund. Progress on drinking water, sanitation and hygiene in Africa 2000–2020: five years into the SDGs. Geneva and New York: WHO and UNICEF; 2022.
8. Krewski D, Yokel RA, Nieboer E, Borchelt D, Cohen J, Harry J, et al. Human health risk assessment for aluminium, aluminium oxide, and aluminium hydroxide. J Toxicol Environ Health B Crit Rev.2007;10 Suppl 1:1–269.doi:10.1080/10937400701597766.
9. Bouchard MF, Sauvé S, Barbeau B, Legrand M, Brodeur MÈ, Bouffard T, et al. Intellectual impairment in school-age children exposed to manganese from drinking water. Environ Health Perspect. 2011;119(1):138–143. doi:10.1289/ehp.1002321.
10. 10.Ward MH, Jones RR, Brender JD, de Kok TM, Weyer PJ, Nolan BT, et al. Drinking water nitrate and human health: an updated review. Int J Environ Res Public Health. 2018;15(7):1557. doi:10.3390/ijerph15071557.

Copyright©2026: The Authors. This is an open access article published by HSD under the CC BY NC ND 4.0 license

11. Frisbie SH, Ortega R, Maynard DM, Sarkar B. The concentrations of arsenic and other toxic elements in Bangladesh's drinking water. Environ Health Perspect. 2002;110(11):1147–1153. doi:10.1289/ehp.021101147.
12. Smedley PL, Kinniburgh DG. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. Appl Geochem. 2002;17(5):517–568. doi:10.1016/S0883-2927(02)00018-5.
13. World Health Organization. Manganese in drinking-water: background document for development of WHO Guidelines for drinking-water quality. Geneva: WHO; 2021. WHO/HEP/ECH/WSH/2021.5.
14. World Health Organization. Nitrate and nitrite in drinking-water: background document for development of WHO Guidelines for drinking-water quality. Geneva: WHO; 2016. WHO/FWC/WSH/16.52.
15. 15.Agency for Toxic Substances and Disease Registry. Toxicological profile for aluminum. Atlanta (GA): U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service; 2008.
16. 16.International Organization for Standardization. ISO 7888:1985. Water quality—Determination of electrical conductivity. Geneva: ISO; 1985.
17. 17.International Organization for Standardization. ISO 7980:1986. Water quality—Determination of calcium and magnesium—Atomic absorption spectrometric method. Geneva: ISO; 1986.
18. 18.International Organization for Standardization. ISO 10390:2021. Soil, treated biowaste and sludge—Determination of pH. Geneva: ISO; 2021.
19. 19.International Organization for Standardization. ISO 14254:2018. Soil quality—Determination of exchangeable acidity using barium chloride solution as extractant. Geneva: ISO; 2018.
20. 20.International Organization for Standardization. ISO 5667-3:2018. Water quality—Sampling—Part 3: Preservation and handling of water samples. Geneva: ISO; 2018.
21. 21.International Organization for Standardization. ISO 10523:2008. Water quality—Determination of pH. Geneva: ISO; 2008.
22. 22. Soil and Plant Analysis Council. Soil analysis: handbook of reference methods. Boca Raton (FL): CRC Press; 2000.
23. 23. Sparks DL, Page AL, Helmke PA, Loeppert RH, editors. Methods of soil analysis. Part 3, Chemical methods. SSSA Book Series No. 5. Madison (WI): Soil Science Society of America and American Society of Agronomy; 1996. doi:10.2136/sssabookser5.3.
24. 24. Baird RB, Eaton AD, Rice EW, editors. Standard methods for the examination of water and wastewater. 23rd ed. Washington (DC): American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation; 2017.
25. 25. Hendershot WH, Lalande H, Duquette M. Soil reaction and exchangeable acidity. In: Carter MR, Gregorich EG, editors. Soil sampling and methods of analysis. 2nd ed. Boca Raton (FL): CRC Press; 2008. p. 173–178. doi:10.1201/9781420005271.ch16.
26. 26. Shapiro SS, Wilk MB. An analysis of variance test for normality (complete samples). Biometrika. 1965;52(3-4):591–611. doi:10.1093/biomet/52.3-4.591.
27. 27. Tukey JW. Comparing individual means in the analysis of variance. Biometrics. 1949;5(2):99–114. doi:10.2307/3001913.
28. 28. Box GEP, Cox DR. An analysis of transformations. J R Stat Soc Series B Stat Methodol. 1964;26(2):211–243. doi:10.1111/j.2517-6161.1964.tb00553.x.
29. 29. Montgomery DC. Design and analysis of experiments. 9th ed. Hoboken (NJ): John Wiley & Sons; 2017.
30. 30. Ahoussi KE, Koffi YB, Kouassi AM, Soro G, Biémi J. Étude hydrochimique et microbiologique des eaux de source de l'ouest montagneux de la Côte d'Ivoire : cas du village de Mangouin-Yrongouin, sous-préfecture de Biankouma. J Appl Biosci. 2013;63:4703–4719.
31. 31 Ahoussi KE, Soro N, Soro G, Lasm T, Oga MS, Zadé SP. Groundwater pollution in Africa's biggest towns: the case of the town of Abidjan, Côte d'Ivoire. Eur J Sci Res. 2008;20(2):302–316.
32. 32. Faye S, Ba MI, Diaw M, Ndoye S. The groundwater geochemistry of the Saloum Delta aquifer: importance of silicate weathering, recharge and mixing processes. Afr J Environ Sci Technol. 2010;4(12):815–830.
33. 33. Ako AA, Shimada J, Hosono T, Ichiyanagi K, Nkeng GE, Fantong WY, et al. 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. Environ Geochem Health. 2011;33(6):559–575. doi:10.1007/s10653-010-9371-1.
34. 34. Yidana SM, Ophori D, Banoeng-Yakubo B. Hydrogeological and hydrochemical characterization of the Voltaian Basin: the Afram Plains area, Ghana. Environ Geol. 2008;53(6):1213–1223. doi:10.1007/s00254-007-0710-1.
35. 35. Edmunds WM, Shand P, editors. Natural groundwater quality. Oxford: Wiley-Blackwell; 2008. doi:10.1002/9781444300345.
36. 36. Lapworth DJ, Nkhuwa DCW, Okotto-Okotto J, Pedley S, Stuart ME, Tijani MN, Wright J. Urban groundwater quality in sub-Saharan Africa: current status and implications for water security and public health. Hydrogeol J. 2017;25(4):1093–1116. doi:10.1007/s10040-016-1516-6.
37. 37. MacDonald AM, Bonsor HC, Ó Dochartaigh BÉ, Taylor RG. Quantitative maps of groundwater resources in Africa. Environ Res Lett. 2012;7(2):024009. doi:10.1088/1748-9326/7/2/024009.
38. 38. Tijani MN. Hydrogeochemical assessment of groundwater in Moro area, Kwara State, Nigeria. Environ Geol. 1994;24(3):194–202. doi:10.1007/BF00766889.
39. 39. Gibrilla A, Fianko JR, Ganyaglo S, Adomako D, Anornu G, Zakaria N. Nitrate contamination and source apportionment in surface and groundwater in Ghana using dual isotopes (^15N and ^18O-NO_3) and a Bayesian isotope mixing model. J Contam Hydrol. 2020 ;233:103658. doi: 10.1016/j.jconhyd.2020.103658.
40. 40. République de Guinée. Décret D/2023/004/PRG/CNRD/SGG du 6 janvier 2023 portant attributions, organisation et fonctionnement de l'Office national de contrôle de qualité. Conakry : Présidence de la République ; 2023.

Copyright©2026: The Authors. This is an open access article published by HSD under the CC BY NC ND 4.0 license