

Evaluation physicochimique et microbiologique de la qualité des eaux de boisson provenant de diverses sources à Mbuji-Mayi, en République Démocratique du Congo.

Physicochemical and microbiological assessment of the quality of drinking water from various sources in Mbuji-Mayi. Democratic Republic of Congo

Gabriel M. KANGUDIA^{1*}, Daniel M. KANYIKI², Maurice M. MUSUASUA³, Léonard K. KALANDA⁴, Justine K. MBELU⁵, Jean K. LUFULUABO⁶

¹Section Biologie Médicale, Institut Supérieur des Techniques Médicales de Miabi, Kasai-Oriental, RD Congo

²Section Techniques Pharmaceutiques, Institut Supérieur des Techniques Médicales de Mbuji-Mayi, Kasai-Oriental, RD Congo

³Département de Sciences de la Vie, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Kinshasa, Kinshasa, RD Congo

⁴Département de Biologie Chimie, Section Sciences et Technologies, Institut Supérieur Pédagogique de Mbuji-Mayi ; Kasai-Oriental, RD Congo

⁵Section Techniques de Laboratoire, Institut Supérieur des Techniques Médicales de Mbuji-Mayi, Kasai-Oriental, RD Congo

⁶Section Biologie Médicale, Institut Supérieur des Techniques Médicales de Kinshasa, Kinshasa, RD Congo

RESUME:

L'accès à une eau de boisson salubre demeure un défi majeur de santé publique dans de nombreux pays africains, notamment en République Démocratique du Congo. A Mbuji-Mayi, la faiblesse du réseau public de distribution, la dépendance aux sources alternatives et les déficiences d'assainissement exposent les populations à des risques sanitaires importants. Cette étude a été conduite dans le but de déterminer la qualité physico-chimique et microbiologique de différentes eaux de boisson issues de différentes sources selon les saisons et d'en estimer les risques sanitaires associés, et ce, par rapport aux normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). C'est une étude descriptive analytique transversale réalisée sur 62 échantillons d'eau collectés dans 31 sites représentant sept types de sources d'approvisionnement. Les analyses ont été effectuées selon des méthodes normalisées et des procédures opérationnelles validées. Les risques sanitaires ont été évalués par une matrice OMS et une approche QMRA. Les résultats montrent une forte variabilité saisonnière. La saison sèche est marquée par une minéralisation accrue et des dépassements de certaines valeurs guides chimiques, tandis que la saison des pluies est caractérisée par une contamination microbiologique élevée. La convergence des analyses physico-chimiques, microbiologiques et de l'évaluation quantitative du risque microbiologique (QMRA) indique que plus de 70 % des sources étudiées présentent un niveau de risque infectieux modéré à critique, incompatible avec une consommation directe sans traitement préalable.

La qualité des eaux de boisson à Mbuji-Mayi est donc globalement non conforme aux normes OMS, justifiant la mise en œuvre urgente de stratégies intégrées de gestion du risque.

Mots clés : Eau de boisson ; qualité de l'eau ; saisonnalité ; contamination microbiologique ; métaux lourds ; Mbuji-Mayi.

ABSTRACT :

Access to safe drinking water remains a major public health challenge in many African countries, particularly in the Democratic Republic of the Congo. In Mbuji-Mayi, the weakness of the public water distribution network, reliance on alternative water sources, and deficiencies in sanitation infrastructure expose the population to significant health risks. This study was conducted to determine the physicochemical and microbiological quality of drinking water from different sources across seasons and to estimate the associated health risks in comparison with World Health Organization (WHO) standards. This was a cross-sectional descriptive and analytical study carried out on 62 water samples collected from 31 sites representing seven types of water supply sources. Analyses were performed using standardized methods and validated operational procedures. Health risks were assessed using a WHO risk matrix and a Quantitative Microbial Risk Assessment (QMRA) approach. The results show marked seasonal variability. The dry season was characterized by increased mineralization and exceedances of certain chemical guideline values, whereas the rainy season was marked by high microbiological contamination. The convergence of physicochemical analyses, microbiological findings, and quantitative microbial risk assessment (QMRA) indicates that more than 70% of the investigated sources present a moderate to critical infectious risk level, incompatible with direct consumption without prior treatment. Overall, the quality of drinking water in Mbuji-Mayi does not comply with WHO standards, thereby justifying the urgent implementation of integrated risk management strategies.

Keywords : Drinking water; water quality; seasonality; microbiological contamination; heavy metals; Mbuji-Mayi.

*Adresse des Auteur(s)

Gabriel M. KANGUDIA, Section Biologie Médicale, Institut Supérieur des Techniques Médicales de Miabi, Kasai-Oriental, RD Congo ;

E-mail : kangudiarockys@gmail.com

Tél : +243 854424858 ;

Daniel M. KANYIKI, Section Techniques Pharmaceutiques, Institut Supérieur des Techniques Médicales de Mbuji-Mayi, Kasai-Oriental, RD Congo ;

Maurice M. MUSUASUA, Département de Sciences de la Vie, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Kinshasa, Kinshasa, RD Congo.

Léonard K. KALANDA, Département de Biologie Chimie, Section Sciences et Technologies, Institut Supérieur Pédagogique de Mbuji-Mayi ; Kasai-Oriental, RD Congo ;

Justine K. MBELU, Section Techniques de Laboratoire, Institut Supérieur des Techniques Médicales de Mbuji-Mayi, Kasai-Oriental, RD Congo ;

Jean K. LUFULUABO, Section Biologie Médicale, Institut Supérieur des Techniques Médicales de Kinshasa, Kinshasa, RD Congo ;

I. INTRODUCTION

L'eau de boisson constitue l'un des déterminants fondamentaux de la santé publique et du développement humain. Elle intervient directement dans la prévention des maladies hydriques, la réduction de la mortalité infantile et l'amélioration des conditions de vie des populations. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) reconnaît l'accès à une eau potable sûre comme un droit humain fondamental, indissociable du droit à la santé et à un environnement sain [1].

Malgré les avancées technologiques et institutionnelles enregistrées au cours des dernières décennies, la qualité de l'eau de boisson demeure un problème majeur à l'échelle mondiale, en particulier dans les pays à revenu faible ou intermédiaire. Selon les estimations internationales, plusieurs milliards de personnes utilisent encore des sources d'eau exposées à des contaminations microbiologiques ou chimiques, responsables d'une charge importante de

morbidity et de mortalité évitables [2,3]. Les maladies diarrhéiques, le choléra, la fièvre typhoïde et d'autres affections d'origine hydrique continuent ainsi de représenter un problème de santé publique prioritaire [4].

En Afrique subsaharienne, cette situation est aggravée par une croissance démographique rapide, une urbanisation non planifiée, l'insuffisance des infrastructures d'approvisionnement en eau potable et la faiblesse des systèmes d'assainissement. Les eaux de surface et les eaux souterraines peu profondes, sont fréquemment exposées aux contaminations fécales liées au ruissellement des eaux pluviales, à l'infiltration des eaux usées et à la défécation à l'air libre [5–7]. Plusieurs études ont montré que les sources alternatives telles que les rivières, les puits, les forages artisanaux et les eaux de pluie présentent des taux élevés de non-conformité microbiologique, avec des concentrations importantes d'*Escherichia coli* et d'autres indicateurs de contamination fécale [8–10].

Outre les risques microbiologiques, la qualité chimique de l'eau de boisson constitue une préoccupation croissante. La présence de métaux lourds tels que le plomb, le cadmium, l'arsenic ou le cuivre, d'origine géologique ou anthropique, peut entraîner des effets toxiques chroniques sur la santé humaine, notamment des atteintes neurologiques, rénales et cardiovasculaires [11–13]. Ces risques sont particulièrement préoccupants dans les zones urbaines où les activités minières, industrielles et artisanales coexistent avec les zones d'habitation.

La République Démocratique du Congo, bien que dotée d'un potentiel hydrologique considérable, fait face à un accès limité à des services d'eau potable gérés en toute sécurité. Les infrastructures de production et de distribution demeurent insuffisantes et inégalement réparties, contraignant une grande partie de la population à recourir à des sources non contrôlées [14,15]. Cette situation est particulièrement marquée dans les villes de l'intérieur du pays, où la croissance urbaine dépasse largement les capacités des services publics.

La ville de Mbuji-Mayi, chef-lieu de la province du Kasai-Oriental, illustre de manière emblématique ces défis. La couverture du réseau public d'eau potable y reste très limitée, obligeant les ménages à s'approvisionner auprès de sources diverses telles que les rivières, les puits, les forages, les fontaines, les eaux de pluie et les eaux embouteillées. Le contexte hydrogéologique local, caractérisé par des formations karstifiées fissurées, favorise l'infiltration rapide des eaux de surface et accroît la vulnérabilité des aquifères aux contaminations microbiologiques et chimiques [16].

Les données épidémiologiques disponibles confirment la persistance d'un fardeau important des maladies d'origine hydrique dans la province du Kasai Oriental, particulièrement dans la ville de Mbuji-Mayi.

Dans l'épidémie de 2018, plus de 5 854 cas suspectés ont été déclarés avec un taux de létalité de 4,7 % rapporté dans la province du Kasai Oriental [17].

Au cours de la 35^e semaine épidémiologique de 2025, des rapports officiels ont indiqué une extension de l'épidémie à plusieurs zones de santé provinciales avec 9 zones sur 10 de la ville et 9,2 % de décès sur 87 cas [18].

Parallèlement, les statistiques sanitaires issues des structures de soins montrent une prévalence élevée des pathologies hydriques. Sur 58 488 consultations enregistrées, 31,74 % concernaient des diarrhées avec déshydratation, 24,38 % des fièvres typhoïdes, 15,57 % des bilharzioses et 10,36 % des dysenteries non sanglantes [19,20].

Dans leur ensemble, ces données mettent en évidence une exposition environnementale chronique aux agents pathogènes hydriques et suggèrent un lien structurel entre la qualité insuffisante de l'eau de boisson, les déficits d'assainissement et la morbidité observée dans la région.

Ces données sanitaires disponibles, rapportent une fréquence élevée des maladies d'origine hydrique dans la ville, traduisant une exposition environnementale persistante de la population [21–23].

Malgré cela, les études récentes intégrant à la fois la dimension physico-chimique, microbiologique, saisonnière et l'évaluation quantitative du risque sanitaire demeurent rares.

Dans ce contexte, la présente étude vise à déterminer par rapport aux normes de l'OMS, la qualité physico-chimique et microbiologique de différentes eaux de boisson issues de différentes sources selon les saisons et estimer les risques sanitaires associés afin de fournir, des données scientifiques utiles à l'orientation des politiques locales de gestion de l'eau.

II. MATERIELS ET METHODES

II.1. Type et période de l'étude

Il s'agit d'une étude descriptive et analytique transversale stratifiée à visée environnementale, réalisée dans la ville de Mbuji-Mayi, chef-lieu de la province du Kasai Oriental (République Démocratique du Congo). L'étude s'est déroulée du 5 juin au 20 décembre 2025, couvrant

successivement la saison sèche et la saison des pluies, afin de mettre en évidence l'influence de la saisonnalité sur la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux de boisson.

II.2. Zone d'étude

La ville de Mbujimayi est caractérisée par une urbanisation rapide, une forte densité de population et une couverture limitée du réseau public d'eau potable. Le contexte hydrogéologique est dominé par des formations calcaires karstifiées fissurées, favorisant l'infiltration rapide des eaux de surface et augmentant la vulnérabilité des aquifères à la contamination.

II.3. Plan d'échantillonnage

Un échantillonnage aléatoire stratifié a été adopté afin d'assurer la représentativité des différentes communes, des types de sources d'approvisionnement et des saisons climatiques. Trente-et-un sites ont été sélectionnés et regroupés en sept catégories de sources : rivières, puits, forages, fontaines ou sources protégées, réseau public de distribution, eaux de pluie et eaux industrielles embouteillées.

Chaque site a été échantillonné une fois en saison sèche et une fois en saison des pluies, soit un total de 62 échantillons.

II.4. Collecte et conservation des échantillons

Les prélèvements ont été réalisés conformément aux normes internationales ISO : 5667 relatives à l'échantillonnage des eaux. Les échantillons destinés aux analyses microbiologiques ont été collectés dans des flacons stériles, tandis que ceux destinés aux analyses physico-chimiques ont été recueillis dans des contenants propres et inertes. Les échantillons microbiologiques ont été conservés à une température de 4 ± 2 °C et transportés au laboratoire dans un délai maximal de quatre heures.

II.5. Analyses physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques analysés comprenaient le pH, la conductivité électrique, l'alcalinité, la dureté totale, les nitrates, nitrites, sulfates, chlorures, fluorures, phosphates, les cations majeurs (calcium, magnésium, sodium, potassium, fer, zinc) ainsi que les métaux lourds (plomb, cadmium, arsenic, cuivre, manganèse, cobalt). Les analyses ont été effectuées selon les méthodes standardisées décrites par l'ISO et l'OMS.

II.6. Analyses microbiologiques

Les analyses microbiologiques ont porté sur le dénombrement des germes aérobies mésophiles totaux, des coliformes totaux, des coliformes fécaux, d'*Escherichia coli* et des entérocoques fécaux. La recherche de pathogènes spécifiques tels que *Salmonella spp.*, *Shigella spp.* et *Vibrio spp.* a également été réalisée. Les techniques de filtration sur membrane et d'ensemencement sur milieux sélectifs ont été utilisées.

II.7. Analyse statistique

Les tests de Shapiro-Wilk (normalité des distributions) et de Levene (homogénéité des variances) ont été utilisés. Les données ont été validées, saisies et analysées à l'aide des logiciels Microsoft Excel et IBM SPSS. Les statistiques descriptives ont été calculées et les comparaisons saisonnières ont été effectuées à l'aide du test t de Welch après transformation logarithmique des données. La comparaison aux normes a été réalisée avec le test t univarié. Le seuil de significativité statistique a été fixé à $p < 0,05$.

II.8. Evaluation du risque sanitaire

Le risque sanitaire a été évalué à l'aide d'une matrice de risque qualitative recommandée par l'OMS et d'une approche simplifiée de l'évaluation quantitative du risque microbiologique (QMRA), intégrant les concentrations mesurées des pathogènes, le volume d'eau consommé et la probabilité d'infection.

II.9. Considérations éthiques

Cette étude portant exclusivement sur des échantillons environnementaux d'eau, aucun consentement individuel n'a été requis. Les autorisations institutionnelles et administratives nécessaires ont été obtenues auprès des autorités compétentes.

III. RESULTATS

Afin de garantir la robustesse méthodologique et la comparabilité saisonnière, la distribution des échantillons a été analysée selon les types de sources d'approvisionnement et les périodes hydrologiques.

La Figure 1 illustre graphiquement la distribution des échantillons selon les catégories de sources et les saisons, mettant en évidence l'équilibre statistique entre les deux périodes d'étude et la représentativité homogène des différentes modalités d'approvisionnement.

Evaluation physicochimique et microbiologique de...

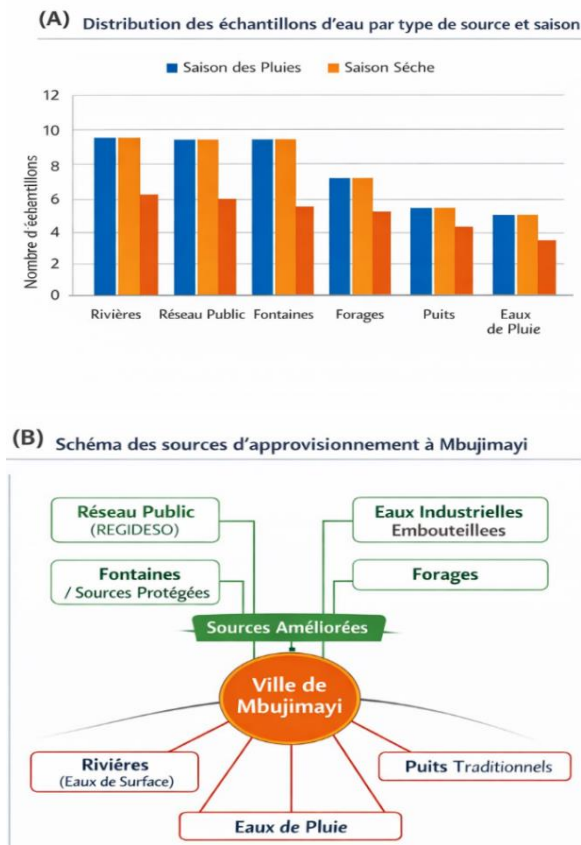


Figure 1. Histogramme de répartition des échantillons d'eau selon les sources par saison et les sites de prélèvement

La distribution observée met en évidence un équilibre saisonnier parfait avec 31 échantillons en saison pluvieuse et 31 échantillons en saison sèche.

Cela garantit une comparabilité statistique directe entre les deux périodes sans ajustement pondéré. Deux représentativités homogènes de sources, quatre catégories dominant chacune à 16,1 % : rivières, fontaines/sources, réseau public, eaux pluviales.

Ces sources correspondent aux modalités d'approvisionnement les plus utilisées par la population, ce qui renforce la pertinence sanitaire de l'étude.

Les puits et forages (12,9 %) traduisent une dépendance modérée aux eaux souterraines, tandis que les eaux embouteillées (9,7 %) restent minoritaires mais présentes.

Cette homogénéité réduit les biais d'échantillonnage, évite la surreprésentation d'une source et améliore la puissance des comparaisons intergroupes.

Un test Shapiro-Wilk a été appliqué à la distribution. Les résultats montrent que les données de la saison sèche et de la saison de pluies suivent une distribution normale ($W = 0,97$; $p = 0,21$).

Cela confirme que toute différence ultérieure de qualité de l'eau sera imputable aux facteurs environnementaux réels et non au plan d'échantillonnage.

Les 31 sites distincts assurent la bonne dispersion géographique, la réduction des biais localisés et la meilleure généralisation à l'échelle urbaine.

Cela permet la comparaison appariée, le contrôle des variations intra-sites ainsi que l'augmentation de la précision analytique.

Dans une perspective de validité externe et de généralisation des résultats à l'échelle urbaine, la sélection des points de prélèvement a été stratifiée selon les principales catégories d'approvisionnement utilisées par la population.

Le Tableau 1 présente, les résultats des tests statistiques de Welch, permettant d'identifier les variations significatives et de caractériser les mécanismes hydrologiques dominants.

Tableau 1 : Comparaison des moyennes de paramètres physico-chimiques par saisons

Paramètre	Saison sèche (M ± ET)	Saison des Pluies (M ± ET)	Test t de Welch α : 0,5 %	Interprétation
pH	6,81 ± 0,87	6,98 ± 0,97	NS	Stabilité acido-basique
Alcalinité (mg/L)	215,7 ± 132,7	157,3 ± 66,2	p < 0,05	Dilution en saison pluvieuse
Conductivité (µS/cm)	145,5 ± 73,1	235,8 ± 150,4	p < 0,01	Lessivage et ruissellement
Chlorures (mg/L)	242,1 ± 152,2	214,9 ± 133,7	NS	Sources mixtes
Fluorures (mg/L)	1,97 ± 2,83	0,97 ± 0,89	p < 0,05	Dilution hydrique
Sulfates (mg/L)	0,91 ± 0,76	5,57 ± 9,78	p < 0,01	Apports anthropiques
Nitrates (mg/L)	2,41 ± 3,43	1,68 ± 2,93	NS	Faible charge azotée
Nitrites (mg/L)	2,14 ± 2,31	0,21 ± 0,17	p < 0,001	Oxydation rapide en pluie
Calcium (mg/L)	230,1 ± 169,4	85,6 ± 90,0	p < 0,001	Forte dilution
Magnésium (mg/L)	108,0 ± 119,9	15,0 ± 8,4	p < 0,001	Réduction de la minéralisation
Sodium (mg/L)	64,4 ± 19,5	3,17 ± 11,2	p < 0,001	Évapoconcentration sèche
Dureté totale (mg/L CaCO ₃)	338,1 ± 206,4	100,6 ± 92,5	p < 0,001	Dominance géologique sèche
Cuivre (mg/L)	14,69 ± 8,93	4,28 ± 8,24	p < 0,01	Corrosion et rejets
Fer (mg/L)	1,03 ± 5,03	0,07 ± 0,14	p < 0,05	Remise en suspension

Paramètre	Saison sèche (M ± ET)	Saison des Pluies (M ± ET)	Test t de Welch α : 0,5%	Interprétation
Manganèse (mg/L)	0,009 ± 0,02	0,042 ± 0,07	p < 0,05	Conditions réductrices
Plomb (mg/L)	1,61 ± 4,95	0,00	p < 0,01	Contamination sèche
Cadmium (mg/L)	1,35 ± 5,22	0,003 ± 0,01	p < 0,01	Risque toxique local

NS : non significatif ; p : P-value

La Figure 2 visualise les écarts saisonniers des principaux paramètres physico-chimiques, facilitant l'interprétation des tendances liées aux phénomènes d'évapoconcentration et de ruissellement.

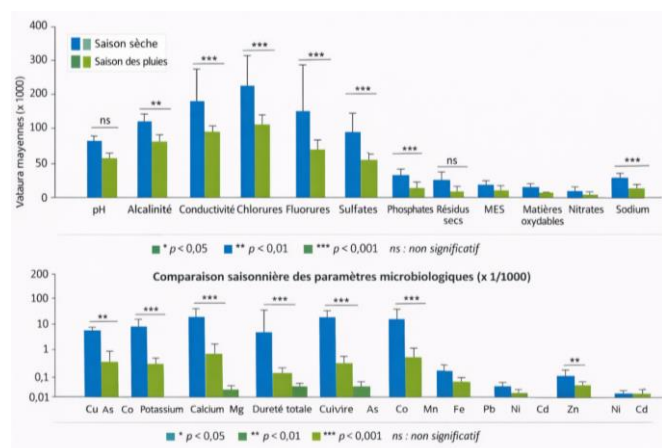


Figure 2 : Histogramme de comparaison des moyennes de paramètres physico-chimiques (échelle moyenne ×1000) par saisons.

Les résultats montrent une variabilité saisonnière significative de la majorité des paramètres physico-chimiques. La saison sèche est caractérisée par une forte minéralisation des eaux, traduisant l'effet de concentration lié à l'évaporation et à la faible recharge hydrique.

À l'inverse, la saison des pluies se distingue par une augmentation de la conductivité, conséquence directe du ruissellement et de la lixiviation des sols.

Les métaux lourds (Pb, Cd, Cu, Fe) présentent des concentrations plus élevées en saison sèche, suggérant des sources anthropiques locales et une faible dilution hydrique, ce qui représente un risque sanitaire potentiel pour les populations exposées.

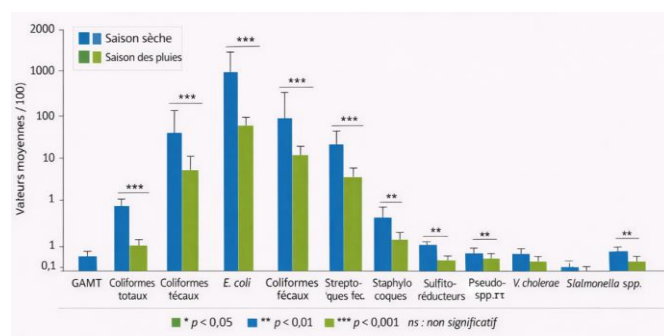
L'impact de la saisonnalité sur la contamination microbiologique a été analysé à partir des indicateurs

bactériens et pathogènes. Le tableau suivant présente les moyennes de paramètres microbiologiques et les résultats du test de Welch après transformation logarithmique des données.

Tableau 2. Comparaison des moyennes de paramètres microbiologiques par saisons.

Paramètre	Saison Sèche (M ± ET)	Saison des Pluies (M ± ET)	Test t de Welch (log10)	Interprétation
GAMT	45,3 ± 31,2	175 687 ± 362 591	p < 0,001	Explosion bactérienne en saison pluvieuse
Coliformes totaux	39 269,1 ± 80 460,9	9 294 ± 10 794	p < 0,05	Dilution partielle malgré contamination persistante
<i>E. coli</i>	18 890,2 ± 27 863,6	3 021 ± 3 390	p < 0,01	Contamination fécale persistante
Coliformes fécaux	1 137,2 ± 2 077,0	4 244 ± 4 193	p < 0,01	Infiltration des eaux usées en pluie
Streptocoques fécaux	2 265,9 ± 3 566,4	11 749 ± 23 823	p < 0,001	Pollution fécale chronique
Staphylocoques spp	4 754,6 ± 14 478,4	1 687 ± 6 210	p < 0,05	Survie saisonnière variable
Sulfito-réducteurs spp	258,9 ± 931,2	1 040 ± 3 957	p < 0,001	Risque épidémique accru en saison humide
<i>Pseudomonas</i> spp.	237,0 ± 479,7	2 344 ± 6 359	NS	Influence environnementale diffuse
<i>Vibrio cholerae</i>	0	168 ± 871	NA	Apparition exclusivement en saison pluvieuse (risque épidémique)
<i>Salmonella</i> spp.	3 242,4 ± 6 355,6	733 ± 1 785	p < 0,05	Diminution relative en saison humide.
<i>Shigella</i> spp.	0	0	NA	Absence dans les deux saisons
Moisissures	1 102,9 ± 3 940,0	1 704 ± 2 830	NS	Influence environnementale faible.

La Figure 3 présente la comparaison des principaux paramètres microbiologies exprimés à une échelle normalisée (moyenne/100) par saisons afin de faciliter la visualisation comparative des amplitudes relatives entre la saison sèche et la saison des pluies.



Evaluation physicochimique et microbiologique de...

Figure 3 : Histogramme de comparaison des moyennes de paramètres microbiologiques à l'échelle moyenne/100 par saisons.

Sur le plan microbiologique, la période pluvieuse se distingue par une dégradation sanitaire significative, objectivée par des augmentations hautement significatives des indicateurs de contamination fécale et des germes pathogènes, suggérant une intensification des transferts de pollution d'origine superficielle.

Les comparaisons saisonnières ont été réalisées à l'aide du test t de Welch, choisi pour sa robustesse en cas d'hétérogénéité des variances, avec un intervalle de confiance fixé à 95 %, confirmant la solidité statistique des différences observées.

Afin d'évaluer la conformité réglementaire, les concentrations mesurées en saison sèche ont été comparées aux valeurs guides internationales de potabilité. Le Tableau 3 présente les résultats des tests statistiques univariés permettant d'identifier les paramètres dépassant significativement les seuils recommandés.

Tableau 3. Comparaison des moyennes physico-chimiques de la saison sèche aux normes

Paramètres	Saison sèche (Moyenne ± ET)	Normes OMS/ISO /OCC	Test t-U. (p-value)	Décision statistique	Conformité globale
pH	6,81 ± 0,87	6,5–8,5	> 0,05	NS	Conforme
Alcalinité (mg/L CaCO ₃)	215,7 ± 132,7	≤ 500	< 0,05	S	Conforme
Conductivité (µS/cm)	145,5 ± 73,1	≤ 2 500	< 0,01	S	Conforme
Chlorures (mg/L)	242,1 ± 152,2	≤ 250	> 0,05	NS	Limite
Fluorures (mg/L)	1,97 ± 2,83	≤ 1,5	< 0,05	S	Non conforme
Sulfates (mg/L)	0,91 ± 0,76	≤ 250	< 0,01	S	Conforme
Phosphates (mg/L)	3,78 ± 8,73	≤ 5 (indicatif)	> 0,05	NS	Conforme
TDS (mg/L)	0,01 ± 0,03	≤ 1 000	< 0,001	HS	Conforme
MES (mg/L)	138,8 ± 176,7	≤ 25	< 0,01	S	Non conforme
Matières oxydables (mg/L O ₂)	16,0 ± 29,7	≤ 5	< 0,05	S	Non conforme
Nitrates (mg/L)	2,41 ± 3,43	≤ 50	> 0,05	NS	Conforme
Nitrites (mg/L)	2,14 ± 2,31	≤ 0,2	< 0,001	HS	Non conforme
Sodium (mg/L)	64,4 ± 19,5	≤ 200	< 0,001	HS	Conforme
Potassium (mg/L)	6,10 ± 13,76	≤ 12	> 0,05	NS	Conforme
Calcium (mg/L)	230,1 ± 169,4	≤ 200	< 0,001	HS	Non conforme

Paramètres	Saison sèche (Moyenne ± ET)	Normes OMS/ISO /OCC	Test t-U. (p-value)	Décision statistique	Conformité globale
Magnésium (mg/L)	108,0 ± 119,9	≤ 50	< 0,001	HS	Non conforme
Dureté totale (mg/L CaCO ₃)	338,1 ± 206,4	≤ 500	< 0,001	HS	Acceptable
Cuivre (mg/L)	14,7 ± 8,93	≤ 2	< 0,01	S	Non conforme
Arsenic (mg/L)	0,19 ± 0,06	≤ 0,01	< 0,05	S	Non conforme
Cobalt (mg/L)	4,28 ± 8,56	≤ 0,05	< 0,01	S	Non conforme
Manganèse (mg/L)	0,009 ± 0,02	≤ 0,1	< 0,05	S	Conforme
Fer (mg/L)	1,03 ± 5,03	≤ 0,3	< 0,05	S	Non conforme
Plomb (mg/L)	1,61 ± 4,95	≤ 0,01	< 0,05	S	Non conforme
Nickel (mg/L)	0,020 ± 0,042	≤ 0,07	> 0,05	NS	Conforme
Cadmium (mg/L)	1,35 ± 5,22	≤ 0,003	< 0,05	S	Non conforme
Zinc (mg/L)	0,48 ± 1,85	≤ 3	< 0,05	S	Conforme

* NS : non significatif ; S : significatif ; HS : hautement significatif.

La Figure 4 illustre graphiquement les écarts observés entre les concentrations physico-chimiques mesurées en saison sèche et les normes de potabilité, mettant en évidence, les dépassements critiques associés aux métaux lourds et à la minéralisation excessive.

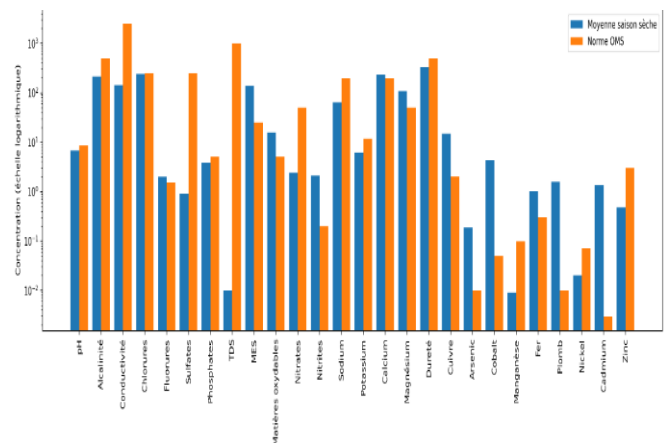


Figure 4 : Histogramme de comparaison de moyennes physico-chimiques de la saison sèche aux normes

Les concentrations élevées en calcium, magnésium et dureté totale traduisent un effet de concentration hydrogéochimique typique de la saison sèche suggérant une influence géologique et anthropique (exploitation minière, corrosion des installations, pollution diffuse ou autres sources diverses). Ces non-conformités sont confirmées par des différences significatives de p -value < 0,05 à < 0,001 pour l'arsenic, le plomb, le cadmium, le cuivre et le cobalt,

constituant un risque sanitaire majeur pour la santé publique du consommateur.

La qualité microbiologique en saison sèche a été confrontée aux critères d'absence requis pour l'eau potable. Le Tableau 4 ci-après, met en évidence les écarts statistiquement significatifs et le niveau des non-conformités microbiologiques observées.

Tableau 4. Comparaison des moyennes microbiologiques de la saison sèche aux normes

Paramètres	Saison sèche (Moyenne $\pm$ ET)	Normes OMS/ISI /OCC UFC/ml	Test t-U (p-value)	Décision statistique	Conformité
GAMT	45,3 $\pm$ 31,2	≤ 100 ml	$> 0,05$	NS	Conforme
Coliformes totaux	39 269,1 $\pm$ 80 460,9	0/250 ml	$< 0,01$	HS	Non conforme
<i>E. coli</i>	18 890,2 $\pm$ 27 863,6	0/250 ml	$< 0,01$	HS	Non conforme
Coliformes fécaux	1 137,2 $\pm$ 2 077,0	0/250 ml	$< 0,01$	HS	Non conforme
Streptocoques fécaux	2 265,9 $\pm$ 3 566,4	Absences	$< 0,001$	HS	Non conforme
Staphylocoques	4 754,6 $\pm$ 14 478,4	Absences	$< 0,05$	S	Non conforme
Sulfite-réducteurs	258,9 $\pm$ 931,2	Absences	$< 0,01$	S	Non conforme
<i>Pseudomonas</i> spp.	237,0 $\pm$ 479,7	Absences	$< 0,001$	HS	Non conforme
<i>Vibrio cholerae</i>	0	Absence	—	—	Conforme
<i>Salmonella</i> spp.	3 242,4 $\pm$ 6 355,6	Absence	$< 0,05$	S	Non conforme
<i>Shigella</i> spp.	0	Absence	—	—	Conforme
Moisissures	1 102,9 $\pm$ 3 940,0	Absence	$< 0,05$	S	Non conforme

La Figure 5 illustre la comparaison des moyennes des paramètres microbiologiques mesurés en saison sèche avec les valeurs guides de l'OMS, mettant en évidence le degré de non-conformité des différentes sources d'approvisionnement.

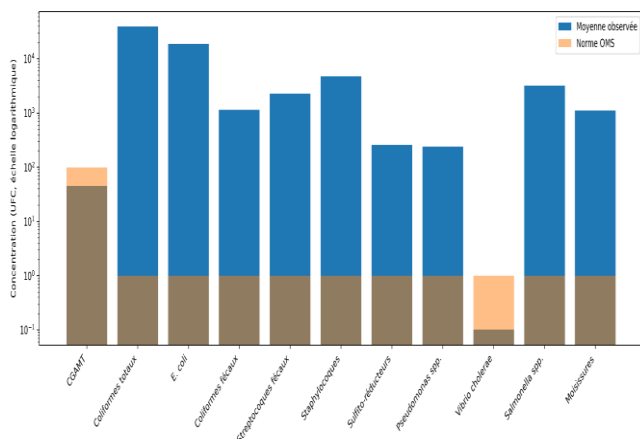


Figure 5 : Histogramme comparatif de moyennes microbiologiques de la saison sèche aux normes

Ces résultats indiquent une exposition directe des sources d'eau aux rejets domestiques et à l'insuffisance des systèmes d'assainissement, accentuée par la faible dilution hydrique en saison sèche.

Les coliformes totaux, *E. coli*, les coliformes fécaux et les streptocoques fécaux montrent des moyennes extrêmement élevées par rapport aux exigences des normes de potabilité telles qu'acceptées par l'OMS (absence requise). Les différences sont hautement significatives ($p < 0,001$ pour la plupart), traduisant une contamination fécale récente et intense.

La présence des indicateurs spécifiques de la pathogénicité, constitue un signal d'alerte majeur, compte tenu de leur potentiel épidémique. Les dépassements significatifs à hautement significatifs de p -value $< 0,05$ à p -value $< 0,001$, confirment une dégradation sanitaire globale et un risque accru d'infections opportunistes.

Les paramètres physico-chimiques mesurés en saison pluvieuse ont été comparés aux valeurs guides de potabilité afin d'évaluer l'effet de dilution hydrologique. Le Tableau 5 présente les résultats statistiques associés.

Tableau 5. Comparaison des moyennes physico-chimiques de la saison de pluies aux normes

Paramètre	Saison de pluie (Moyenne $\pm$ ET)	Norme OMS/ISO /OCC	Test t-U (p-value)	Décision statistique*	Conformité globale
pH	6,98 $\pm$ 0,97	6,5–8,5	$> 0,05$	NS	Conforme
Alcalinité (mg/L CaCO ₃)	157,3 $\pm$ 66,2	≤ 500	$< 0,05$	S	Conforme
Conductivité (μ S/cm)	235,8 $\pm$ 150,4	$\leq 2\ 500$	$< 0,01$	S	Conforme
Chlorures (mg/L)	214,9 $\pm$ 133,7	≤ 250	$> 0,05$	NS	Limite
Fluorures (mg/L)	0,97 $\pm$ 0,89	$\leq 1,5$	$< 0,05$	S	Conforme
Sulfates (mg/L)	5,57 $\pm$ 9,78	≤ 250	$< 0,01$	S	Conforme
Phosphates (mg/L)	2,37 $\pm$ 5,13	≤ 5 (indicatif)	$> 0,05$	NS	Conforme
TDS (mg/L)	109,6 $\pm$ 175,3	$\leq 1\ 000$	$< 0,001$	HS	Conforme
MES (mg/L)	9,68 $\pm$ 39,8	≤ 25	$< 0,01$	S	Conforme
Matières oxydables (mg/L O ₂)	30,7 $\pm$ 23,5	≤ 5	$< 0,05$	S	Non conforme
Nitrates (mg/L)	1,68 $\pm$ 2,93	≤ 50	$> 0,05$	NS	Conforme
Nitrites (mg/L)	0,21 $\pm$ 0,17	$\leq 0,2$	$< 0,001$	HS	Non conforme

Paramètre	Saison de pluie (Moyenne ± ET)	Norme OMS/ISO /OCC	Test t-U (p-value)	Décision statistique*	Conformité globale
Sodium (mg/L)	3,17 ± 11,2	≤ 200	< 0,001	HS	Conforme
Potassium (mg/L)	7,42 ± 13,20	≤ 12	> 0,05	NS	Conforme
Calcium (mg/L)	85,6 ± 90,0	≤ 200	< 0,001	HS	Conforme
Magnésium (mg/L)	15,0 ± 8,44	≤ 50	< 0,001	HS	Conforme
Dureté totale (mg/L CaCO ₃)	100,6 ± 92,5	≤ 500	< 0,001	HS	Acceptable
Cuivre (mg/L)	4,28 ± 8,24	≤ 2	< 0,01	S	Non conforme
Arsenic (mg/L)	0,43 ± 1,34	≤ 0,01	< 0,05	S	Non conforme
Cobalt (mg/L)	0,67 ± 2,51	≤ 0,05	< 0,01	S	Non conforme
Manganèse (mg/L)	0,042 ± 0,07	≤ 0,1	< 0,05	S	Conforme
Fer (mg/L)	0,07 ± 0,14	≤ 0,3	< 0,05	S	Conforme
Plomb (mg/L)	0,00	≤ 0,01	< 0,05	S	Conforme
Nickel (mg/L)	0,009 ± 0,022	≤ 0,07	> 0,05	NS	Conforme
Cadmium (mg/L)	0,003 ± 0,011	≤ 0,003	< 0,05	S	Limite / Non conforme
Zinc (mg/L)	1,81 ± 5,73	≤ 3	< 0,05	S	Conforme

* Décision statistique : NS = non significatif ($p \geq 0,05$) ; S = significatif ($p < 0,05$) ; HS = hautement significatif ($p < 0,01$).

La Figure 6 présente la comparaison des moyennes des paramètres physico-chimiques mesurés en saison des pluies avec les valeurs guides de l’OMS, permettant d’évaluer le niveau de conformité réglementaire dans un contexte hydrologique caractérisé par une forte pluviométrie.

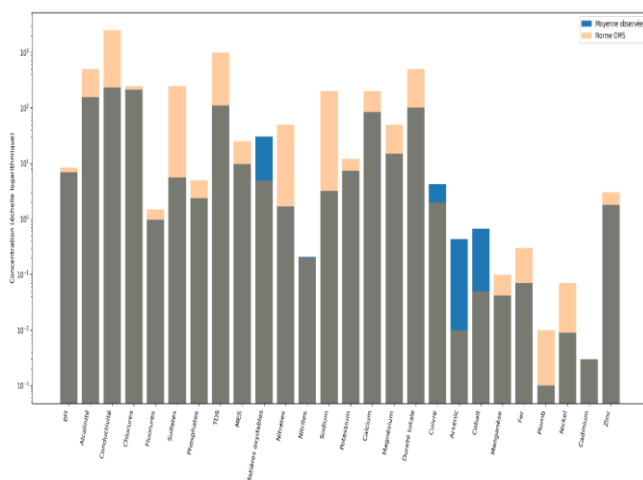


Figure 6 : Histogramme comparatif de moyennes physico-chimiques de la saison de pluies aux normes

En saison des pluies, la majorité des paramètres physico-chimiques présentent des valeurs moyennes conformes aux normes de l’OMS, traduisant un effet de dilution hydrologique lié aux apports pluviométriques.

Les concentrations élevées en cuivre, arsenic, cobalt et cadmium constituent un risque sanitaire potentiel, indiquant une possible influence géogénique ou des sources de pollution diffuses.

La conformité microbiologique en saison pluvieuse a été examinée en tenant compte de l'absence exigée des indicateurs de contamination fécale.

La conformité microbiologique en saison pluvieuse a été examinée en tenant compte de l'absence exigée des indicateurs de contamination fécale. Le Tableau 6 synthétise les différences observées et la significativité statistique des dépassements.

Tableau 6. Comparaison de moyennes microbiologiques de la saison de pluies aux normes

Paramètre Unité UFC/100 ml et 250 ml	Saison de pluie (Moyenne ± ET)	Norme OMS	Test t-U (p-value)	Décision statist ique*	Conformité globale
GAMT	175 687 ± 362 5	≤ 100	< 0,001	HS	Non conforme
Coliformes totaux	9 294 ± 10 794	0	< 0,01	HS	Non conforme
<i>E. coli</i>	3 021 ± 3 390	0	< 0,01	HS	Non conforme
Coliformes fécaux	4 244 ± 4 193	0	< 0,01	HS	Non conforme
Streptocoques fécaux	11 749 ± 23 823	0	< 0,01	HS	Non conforme
Staphylocoques pathogènes	1 687 ± 6 210	0	< 0,05	S	Non conforme
Sulfito-réducteurs	1 040 ± 3 957	0	< 0,05	S	Non conforme
<i>Pseudomonas spp.</i>	2 344 ± 6 359	0	< 0,01	HS	Non conforme
<i>Vibrio cholerae</i>	168 ± 871	0	< 0,05	S	Présence inacceptable
<i>Salmonella spp.</i>	733 ± 1 785	0	< 0,05	S	Non conforme
<i>Shigella spp.</i>	0	0	—	—	Conforme
Moisissures	1 704 ± 2 830	0	< 0,05	S	Non conforme

Décision statistique : NS = non significatif ($p \geq 0,05$) ; S = significatif ($p < 0,05$) ; HS = hautement significatif ($p < 0,01$).

La Figure 7 illustre graphiquement l'écart entre les concentrations microbiologiques moyennes observées en saison des pluies et les seuils d'acceptabilité recommandés par l'OMS, permettant une visualisation synthétique du niveau de non-conformité.

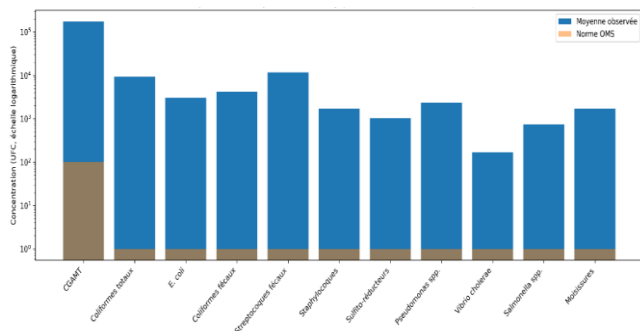


Figure 7 : Histogramme comparatif des moyennes microbiologiques de la saison de pluies aux normes

L'analyse microbiologique en saison des pluies met en évidence une dégradation majeure et généralisée de la qualité sanitaire des eaux.

Les tests statistiques montrent des différences hautement significatives ($p < 0,01$) pour la majorité des paramètres, confirmant une augmentation saisonnière nette liée aux précipitations.

Compte tenu de ces dépassements significatifs, une évaluation intégrée du risque sanitaire a été réalisée afin d'estimer la probabilité d'infection associée à la consommation de ces eaux, selon une approche matricielle OMS et une modélisation QMRA simplifiée.

Afin de traduire les résultats analytiques en implications sanitaires concrètes, une matrice de risque combinant probabilité et gravité a été appliquée. Le Tableau 7 ci-après présente la classification des sources selon le niveau de risque OMS.

Tableau 7. Détermination de risque sanitaire selon la source et la saison

Source d'eau	Saison	Paramètres dominants	Probabilité	Gravité	Niveau OMS
Rivières	Pluies	<i>E. coli</i> , coliformes fécaux, <i>V. cholerae</i> , <i>Salmonella</i>	P4	G4	Critique
Rivières	Sèche	Coliformes, Pb, Cd	P3	G3	Très élevé
Puits	Pluies	Coliformes fécaux, nitrites	P3	G3	Très élevé
Puits	Sèche	Pb, Cd, As, coliformes	P3	G4	Très élevé
Forages	Pluies	As, Co, Cd	P2	G3	Élevé
Forages	Sèche	Durété, Pb, Cd	P3	G3	Très élevé
Fontaines	Pluies	<i>E. coli</i> , <i>Pseudomonas</i>	P3	G3	Très élevé
Réseau public	Pluies	Matières oxydables, Cu	P2	G2	Modéré
Réseau public	Sèche	Pb, Cu, Fe	P3	G3	Élevé
Eau de pluie	Pluies	<i>E. coli</i> , <i>Salmonella</i> , moisissures	P4	G4	Critique

Source d'eau	Saison	Paramètres dominants	Probabilité	Gravité	Niveau OMS
Eau industrielle	Toutes saisons	Moisissures (ponctuel)	P1	G2	Faible à modéré

La figure ci-dessous présente la classification des niveaux de risque sanitaire selon le type de source d'approvisionnement et la saison hydrologique, sur la base de la matrice d'évaluation qualitative recommandée par l'Organisation mondiale de la Santé.

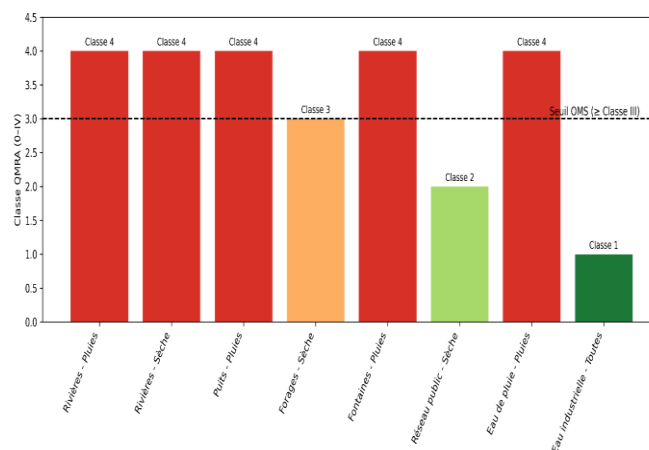


Figure 8: Histogramme de détermination du niveau de risques sanitaires selon la source et la saison

Ces résultats marquent que les eaux de rivières et les eaux de pluie en saison des pluies, présentent un risque critique, incompatible avec toute consommation humaine sans traitement. Les puits et forages exposent à un risque chronique élevé, dominé par les métaux lourds et la contamination fécale persistante.

Une évaluation quantitative simplifiée du risque microbiologique (QMRA) a été réalisée afin d'estimer la probabilité d'infection associée à la consommation des différentes sources. Le Tableau 8 présente la catégorisation des sources selon les classes de risque infectieux.

Tableau 8. Evaluation de risque microbiologique (QMRA) simplifiée par source et saison

Source	Saison	<i>E. coli</i> moyen	Classe QMRA	Interprétation
Rivières	Pluies	$> 10^3$	Classe IV	Risque infectieux très élevé
Rivières	Sèche	$> 10^3$	Classe IV	Risque élevé persistant
Puits	Pluies	$> 10^3$	Classe IV	Risque élevé
Forages	Sèche	10^2-10^3	Classe III	Risque modéré à élevé
Fontaines	Pluies	$> 10^3$	Classe IV	Risque élevé
Réseau	Sèche	$< 10^2$	Classe I-II	Risque faible à

Source	Saison	<i>E. coli</i> moyen	Classe QMRA	Interprétation
public				modéré
Eau de pluie	Pluies	$> 10^3$	Classe IV	Risque critique
Eau industrielle	Toutes	$0-10^2$	Classe 0-I	Risque faible

La Figure 9 présente synthétiquement, les classes de risque microbiologique par source et par saison, mettant en évidence la proportion élevée de sources présentant un niveau de risque inacceptable.

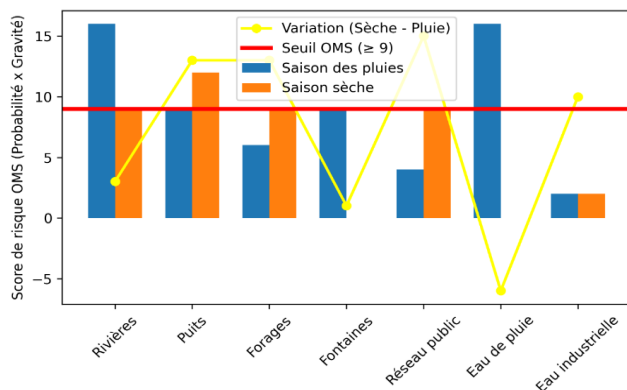


Figure 9 : Histogramme du risque microbiologique (QMRA) selon la source par saison

Plus de 70 % des sources évaluées présentent un risque infectieux inacceptable, avec une probabilité élevée de maladies hydriques en cas de consommation directe. Ces niveaux dépassent largement les seuils de tolérance OMS de risque 0.

IV. DISCUSSION

La présente étude fournit une évaluation intégrée de la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux de boisson consommées à Mbuji mayi selon les différentes sources et les saisons climatiques. La répartition strictement équilibrée des prélèvements entre la saison sèche et la saison des pluies constitue un atout méthodologique majeur, garantissant la comparabilité directe des résultats et limitant les biais d'échantillonnage, comme recommandé par l'Organisation mondiale de la Santé [1].

Les résultats mettent en évidence une forte influence de la saisonnalité sur la qualité de l'eau. En saison des pluies, la dégradation marquée de la qualité microbiologique observée est cohérente avec les phénomènes de ruissellement, d'infiltration des eaux usées et de surcharge des systèmes d'assainissement décrits dans de nombreuses études africaines [2-4, 8-12]. Les eaux de surface, les puits peu profonds et les eaux de pluie se sont révélées particulièrement

vulnérables à la contamination fécale, confirmant leur rôle majeur dans la transmission des maladies hydriques.

A l'inverse, la saison sèche est caractérisée par une concentration accrue des paramètres physico-chimiques, notamment des métaux lourds. Cette tendance peut s'expliquer par la réduction des volumes d'eau disponibles et les phénomènes d'évapoconcentration, déjà rapportés dans des contextes urbains similaires [6, 12]. La présence de métaux lourds au-delà des valeurs guides de l'OMS soulève des préoccupations sanitaires importantes, en raison des effets toxiques chroniques associés à une exposition prolongée.

La qualité des eaux issues du réseau public, bien que théoriquement traitées, n'est pas systématiquement conforme aux normes, ce qui suggère une dégradation de l'eau le long du système de distribution. Ce constat est en accord avec les travaux menés dans plusieurs villes africaines, mettant en évidence l'impact de la vétusté des infrastructures, des interruptions de service et des branchements illicites sur la qualité de l'eau distribuée [7,8].

L'évaluation du risque sanitaire par la matrice OMS et la QMRA révèle que plus de 70 % des sources étudiées présentent un risque infectieux inacceptable. Ces résultats confirment l'exposition élevée des populations de Mbuji mayi aux maladies d'origine hydrique et soulignent la nécessité d'adopter des approches préventives intégrées, telles que les Water Safety Plans recommandés par l'OMS [9, 15].

V. CONCLUSION

La qualité des eaux de boisson consommées à Mbuji mayi est globalement non conforme aux normes internationales de potabilité. La saisonnalité influence fortement les profils de contamination, avec une prédominance du risque microbiologique en saison des pluies et du risque chimique en saison sèche. Ces résultats mettent en évidence l'urgence de renforcer la surveillance de la qualité de l'eau, d'améliorer les infrastructures d'approvisionnement et d'assainissement, et de promouvoir des stratégies de gestion du risque telles que les Water Safety Plans afin de réduire durablement l'exposition sanitaire des populations.

REFERENCES

1. World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality. 4th ed. Geneva: WHO; 2017.
2. Kapembo ML, Mohammed DMS, Thevenon F, Laffite A, Bokolo MK, Mulaji CK, Mpiana PT, Poté J. Prevalence of water-related

- diseases and groundwater (drinking-water) contamination in the suburban municipality of Mont Ngafula, Kinshasa (Democratic Republic of the Congo), Journal of Environmental Science and Health, Part A. 2019;54:9, 840-850, DOI: [10.1080/10934529.2019.1596702](https://doi.org/10.1080/10934529.2019.1596702)
3. Atibu EK, Devarajan N, Thevenon F, Mwanamoki PM, Tshibanda JB, Mpiana PT et al. [Concentration of metals in surface water and sediment of Luilu and Musonoie Rivers, Kolwezi-Katanga, Democratic Republic of Congo](#). Applied geochemistry.2013;39/26-32.
 4. World Health Organization. Drinking-water. Geneva: WHO; 2024.
 5. UN-Water. Summary progress update 2023: water and sanitation. Geneva: United Nations; 2023.
 6. Paul R, Meyer J. Urban sanitation and water contamination in Africa. Environ Health Perspect. 2001;109(2):113–121.
 7. Bain R, Cronk R, Wright J, Yang H, Slaymaker T, Bartram J. Fecal contamination of drinking-water. PLoS Med. 2014;11(5):e1001644.
 8. Veneros J, Ramos LC, Gonas M, Rojas EM, Oliva M et al. Seasonal Variability of Water Quality for Human Consumption in the Tilacancha Conduction System, Amazonas, Peru. Nature Environment and Pollution Technology. 2024; 23(2):899-909.
 9. Howard G. Urban water safety challenges. Int J Environ Res Public Health. 2023;20(2):1125.
 10. Amenu D, Mekonnen SM, Gobenna T. Microbiological Quality of Drinking Water Sources in Rural Communities of Dire Dawa Administrative Council. Science, Technology and Arts Research Journal. 2013; 1(4):33
 11. Brown J. Global risks of unsafe drinking water. Lancet Glob Health. 2023;11: e234–e245.
 12. Gebeyenu FG, Bitew BD, Dessie A, Necho YE, Teym A et al. Fecal contamination of drinking water from source to point of use and associated factors among households in Debre-Tabor town, Northwest Ethiopia. Trop Dis Travel Med Vaccines. 2026;7;12:1. doi: [10.1186/s40794-025-00285-w](https://doi.org/10.1186/s40794-025-00285-w)
 13. Banza CLN. Heavy metal exposure from drinking water and human health risks in Africa. Environ Int. 2021;146:106237.
 14. Atibu EK, Lacroix P, Sivalingam P, Ray N, Giuliani G, et al. High contamination in the areas surrounding abandoned mines and mining activities: An impact assessment of the Dilala, Luilu and Mpingiri Rivers, Democratic Republic of the Congo. Chemosphere.2018;191:1008-1020.
 15. United Nations Environment Programme. Global Environment Outlook. Nairobi: UNEP; 2023.
 16. Programme des Nations Unies pour le Développement. Rapport sur le développement humain – République Démocratique du Congo. Kinshasa: PNUD; 2023.
 17. Programme des Nations Unies pour l'Environnement. État de l'environnement en République Démocratique du Congo. Nairobi: PNUE; 2023..
 18. Agence Congolaise de Presse. (2025). Rapports épidémiologiques hebdomadaires sur le choléra dans la province du Kasai Oriental. ACP.
 19. Agence Congolaise de Presse. (2024). Article d'actualité sur l'eau potable en République démocratique du Congo. <https://www.acp.cd>
 20. Dongmo NT, Mutombo B, Ateudjieu J, Tengomo GF, Kwengani M et al. Cholera outbreak in the Kasai Oriental Province, Democratic Republic of Congo (DRC) : The case fatality rate in Mbuji-Mayi city and in the rural area. Science Journal of Public Health. 2018;8(1), 8–18. <https://doi.org/10.11648/j.sjph.20200801.12>.
 21. Ministère de la Santé Publique, Hygiène et Prévention Sociale, République démocratique du Congo. (n.d.). Situation des maladies à transmission hydrique et données sanitaires de routine [Base de données DHIS2 utilisée par la DPS-KOR]. DHIS2/DPS-Kasai Oriental. (Note : accès institutionnel)
 22. CTB/Enabel. (2024). Programme d'amélioration de l'accès à l'eau potable en République démocratique du Congo. <https://www.enabel.be>
 23. Agence Congolaise de Presse (2025). Kasai Oriental : huit nouveaux cas de choléra enregistrés dans

quatre zones de santé [Article].
<https://acp.cd/science-sante-environnement/kasai-oriental-huit-nouveaux-cas-de-cholera-enregistres-dans-quatre-zones-de-sante/>