

Evaluation de la qualité des eaux de forages et de puits destinées à la consommation humaine: Approches d'analyses multivariées

[Assessment of the borehole and well water quality intended for human consumption: Multivariate analysis approaches]

Kandana Marthe Yéo¹, Aya Nelly Berthe Kouadio², and Droh Lanciné Goné²

¹Centre de Recherche Ecologique, Université Nangui Abrogoua, 08 BP 109 Abidjan 08, Côte d'Ivoire

²Laboratoire de Géosciences et Environnement, Université Nangui Abrogoua, 02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire

Copyright © 2023 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The poor condition of Grand-Bassam's boreholes and the drinking water wells of the local population led to an assessment of their hygienic quality. Several data analysis approaches were performed on 4 boreholes and 17 well water samples. Indeed, physico-chemical and bacteriological analysis, as well as Water Quality Index and Principal Component Analysis were used to differentiate the characteristics of borehole and well water in order to determine the level and origin of water pollution. The results showed that all chemical borehole water quality was poor, while of 35% and 65% of well chemical water quality were good and satisfactory, respectively. Owing to soil nature, the iron and manganese contents were $0.73 \pm 0.23 \text{ mg.L}^{-1}$ and $0.1 \pm 0.07 \text{ mg.L}^{-1}$ respectively. The high presence of *fecal streptococci*, *salmonella* and *shigella* in the borehole water, as well as *Escherichia coli*, total coliforms and fecal coliforms in the well water, thereby underscoring the poor microbiological quality of water (90,53% of borehole and 92% of well), which is contaminated by septic tank water. Furthermore, the high presence of *Salmonella* in borehole water suggests that it may contain hydrogen sulfide, which is responsible for its unpleasant odors.

KEYWORDS: Borehole, Water quality index, Principal Component Analysis, Faecal pollution.

RESUME: La mauvaise odeur des eaux de certains forages et puits consommées par une frange de la population de Grand-Bassam a suscité l'évaluation de leurs qualités hygiéniques. Afin de déterminer le niveau et l'origine de cette pollution, les eaux de 4 forages et 17 puits ont fait l'objet d'analyses physico-chimiques et bactériologiques sélectives et l'Indice de Qualité des Eaux et l'Analyse en Composante Principale ont été effectués. Les résultats montrent des valeurs élevées de fer ($0,73 \pm 0,23 \text{ mg.L}^{-1}$) et de manganèse ($0,1 \pm 0,07 \text{ mg.L}^{-1}$) provenant du sol, responsable de la mauvaise qualité chimique des eaux. Il ressort qu'au niveau chimique, toutes les eaux de forage sont de mauvaise qualité contre 35 % et 65 % d'eau de puits de bonne et satisfaisante qualité. Au niveau microbiologique, 68 % et 60 % des eaux de forage et de puits sont impropres à la consommation. La mauvaise qualité microbiologique des eaux de forage est due à l'abondance de streptocoques fécaux, *salmonella* et *shigella* et celle des puits est liée aux fortes charges de *Escherichia coli*, de coliformes totaux et fécaux. Cette pollution d'origine fécale des eaux proviendrait de la communication entre ces ouvrages et les fosses septiques. Par ailleurs, la forte présence des *Salmonella* dans les eaux de forages témoigne que celles-ci pourraient contenir de l'hydrogène sulfuré responsable de leurs mauvaises odeurs.

MOTS-CLEFS: Eau souterraine, Indice de qualité des eaux, Analyse en Composante Principale, Pollution fécale.

1 INTRODUCTION

L'eau de consommation doit répondre d'une part aux critères de qualité physico-chimique qui correspondent aussi bien à l'absence d'éléments chimiques indésirables ou toxiques qu'à une teneur naturelle en sels minéraux équilibrée [1], et d'autre part, elle doit être exemptée d'agents pathogènes car l'eau contaminée est source de maladies comme les gastroentérites, l'hépatite virale, douleurs abdominales, typhoïdes, leptospirose...qui causent la mortalité de millions de nourrissons et d'enfants chaque année [2]. De ce fait, la nécessité de contrôler la qualité de l'eau consommée par la population est une obligation.

En Côte d'Ivoire, de nombreuses études réalisées sur la qualité des eaux de forages et puits ont montré des niveaux de risques sanitaires élevés liés à la consommation humaine d'eau de mauvaise qualité ([3], [4]). Ces eaux constituant généralement la principale ressource en eau potable des populations sont sous la dépendance d'un ensemble de facteurs naturels et anthropiques qui entraînent la détérioration de leur

qualité hygiénique [5]. Dans la ville de Grand-Bassam, les eaux de forage de certains ménages ont une mauvaise odeur et font l'objet de plusieurs plaintes. La détérioration de ce paramètre organoleptique pourrait témoigner de la dégradation de la qualité chimique et bactériologique de ces eaux. Face à cette situation, la prévention et le contrôle de la pollution des eaux souterraines de cette ville s'imposent et doivent reposer sur une analyse fiable de la qualité de l'eau et de l'identification des sources de polluants [6]. Les données de surveillance sont généralement analysées à l'aide de méthodes statistiques [7], notamment l'analyse en composante principale (ACP), la matrice de corrélation (MC), l'analyse factorielle (FA), l'analyse discriminante (DA), la régression linéaire multiple (RLM), l'analyse de la variance (ANOVA) et les indices de qualité de l'eau (IQE) qui se sont avérées utiles pour expliquer l'origine de la pollution. Certaines études récentes qui ont été couronnées de succès grâce à l'utilisation des analyses multivariées incluent les travaux de ([8], [9], [10]). Ces chercheurs ont montré que les approches statistiques multivariées peuvent être utilisées pour réduire les dimensions des données, faire ressortir les variables statistiquement significatives qui sous-tendent les variations de la qualité de l'eau, évaluer la relation entre les variables et identifier les sources de pollution de ces eaux etc. Vue l'urgence et la nécessité de la consommation quotidienne de ces eaux et l'exposition probable de cette population aux risques sanitaires, il est impérieux de déterminer la qualité chimique et microbiologique des eaux de puits et forages et utiliser les outils statistiques pour déterminer le degré et les sources de pollution.

2 MATERIEL ET METHODES

2.1 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La ville de Grand Bassam est localisée au Sud-Est de la Côte-d'Ivoire sur le littoral dans la région du Sud Comoé, entre 05° 21' de latitude Nord et 03° 46' de longitude Ouest, à 43 Km au Sud-Est d'Abidjan (Figure 1). Elle couvre une superficie totale de 127 Km² environ et est limitée au Sud par l'Océan Atlantique, au Sud-Est par la ville de Bonoua, au Nord-Est par la ville d'Alépé, au Nord par la ville de Bingerville et à l'Ouest par celle d'Abidjan [11]. Son climat sub-équatorial est caractérisé par deux saisons de pluies (Avril-Juillet et Septembre - Octobre) alternées par deux saisons sèches (Août-Septembre et Décembre-Mars). La pluviométrie et la température annuelle sont respectivement 2 149,6 mm et 27,9 °C [11].

Grand-Bassam est située dans la zone centrale du bassin sédimentaire du Sud de la Côte d'Ivoire et est caractérisée par des plaines dont les altitudes dépassent rarement les 50 m. Les sables des cordons marins et les sables argileux quaternaires renferment des eaux douces connues sous le nom de "nappe du Quaternaire". La perméabilité des terrains superficiels dans lesquels se développe la nappe du quaternaire se situe entre 10⁻⁴ m.s⁻¹ et 10⁻³ m.s⁻¹ pour les sables argileux et 10⁻³ m.s⁻¹ pour les sables des cordons marins [12]. Les sols ferrallitiques et hydromorphes des bas-fonds y prédominent.

2.2 ECHANTILLONNAGE ET ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE ET MICROBIOLOGIQUE DES EAUX

Les forages et puits ont été choisis en fonction de leurs accessibilités, leurs usages, leurs bonnes répartitions spatiales et des pressions anthropiques exercées sur ces ouvrages. Sur la base de ces critères ci-définis, quatre (4) forages (F1 à F4) et dix-sept (17) puits (P1 à P17) dont les coordonnées géographiques ont été relevées par un GPS de marque MLR SP 12X ont été retenus (Figure 1). Les forages sont situés dans des concessions propres avec de bon système de protection (Tableau I).

Chaque forage et puits ont fait l'objet de deux prélèvements par campagne (Trente-quatre (34) échantillons d'eau de puits et huit (8) échantillons d'eau de forages) en mai 2022. L'un des échantillons est destiné à l'analyse des paramètres chimiques et l'autre à l'analyse des paramètres microbiologiques. Pour les analyses chimiques, les échantillons d'eau de puits ont été prélevés à l'aide d'une puisette et ceux des forages directement au robinet du système d'équipement du forage dans des flacons en polyéthylène de 500 mL préalablement lavés et étiquetés. Concernant les analyses microbiologiques, les prélèvements ont été fait dans des flacons en bouteille préalablement stérilisés à l'autoclave à 121°C.

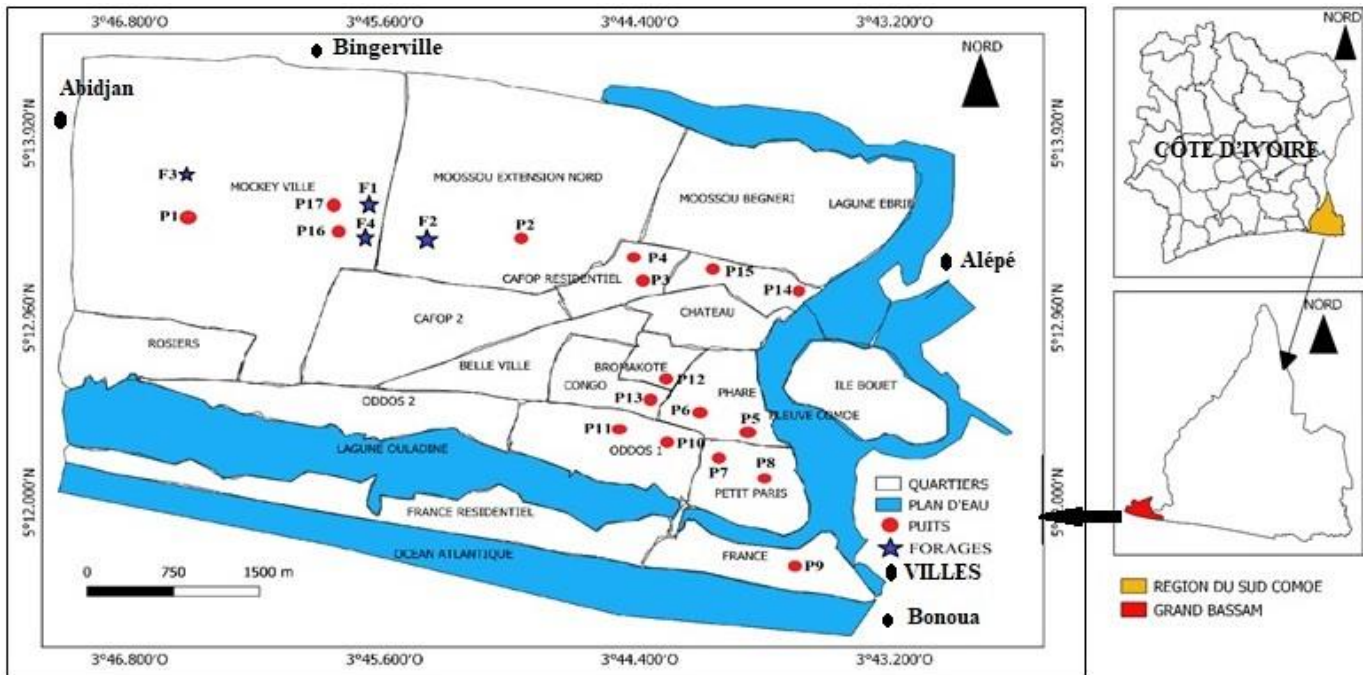


Fig. 1. Localisation de la zone d'étude et des forages et puits échantillonnés

Tableau 1. Caractéristiques environnementales des forages et puits

Ouvrages		Niveau d'eau (m)	Distance puits-fosse septique (m)	Conditions environnementales des puits et forages
Forage	Minimum	7	14	Ouvrages situés dans des concessions propres avec un bon système de protection
	Moyenne	13	16,45	
	Maximum	18	19	
	Ecartype	4,69	2,77	
Puits	Minimum	0,47	1,9	Ouvrages situés dans des concessions propres comme insalubres, sans systèmes de protection quelquefois
	Moyenne	1,60	11,53	
	Maximum	3,94	19	
	Ecartype	1,07	5,02	

Tous ces échantillons ont ensuite été conservés à l'abri de la lumière dans des glacières contenant des packs réfrigérants (4 °C) puis, transportés au laboratoire pour les différentes analyses.

Sur le terrain, le pH, la température, la conductivité, l'oxygène dissous, la salinité, le potentiel redox et les solides totaux dissous (TDS) ont été mesurés à l'aide d'un multi-paramètre HANNA (Hi 9829). La turbidité a été mesurée à avec un turbidimètre HANNA (Hi 98703).

Au laboratoire, l'analyse du fer, du manganèse, de l'absorbance UV254, de l'ammonium, des nitrites et des nitrates a été effectuée avec le spectrophotomètre d'absorption moléculaire DR 6000 HACH (SODIMEL, France).

La méthode de filtration sur membrane (ISO 9308-1.2000, ISO 7899-2.2000) a été utilisée pour le dénombrement des bactéries dans le cadre cette étude. Les valeurs obtenues sont comparées aux valeurs guides (Tableau II).

2.3 TRAITEMENT ET ANALYSE STATISTIQUE DES DONNÉES

Les tests non-paramétriques de Kruskal-Wallis et de Mann-Whitney ont été utilisés pour comparer les eaux des forages et puits. Ces tests ont été utilisés à un niveau de significativité de p de 95 % ($p < 0,05$) et ont été couplés aux boîtes à moustaches pour la distribution des paramètres.

2.3.1 INDICE DE QUALITÉ CHIMIQUE ET MICROBIOLOGIQUE DES EAUX DE FORAGE ET DE PUIS

L'indice de qualité de l'eau (IQE) est un outil d'évaluation et de communication fiable, qui fournit des informations utiles et efficaces sur la qualité globale de l'eau d'une manière consensuelle [13]. L'indice fournit une valeur unitaire qui traduit l'adéquation globale de la qualité de l'eau pour un objectif spécifique tel que la boisson, l'irrigation ou la protection de la vie aquatique et la qualité globale de l'eau d'un certain échantillon d'eau (en fonction du lieu et du moment) pour plusieurs paramètres de qualité de l'eau. Plusieurs indices ont été développés et appliqués avec succès pour l'évaluation de la qualité de l'eau. Cependant, l'IQE mis au point par le Conseil canadien des ministres de l'environnement (IQE du CCME) a été utilisé dans cette étude parce qu'il est non seulement relativement plus robuste mais aussi flexible pour s'adapter à divers paramètres de qualité de l'eau et à diverses recommandations [14]. La valeur de l'IQE du CCME est obtenue par la comparaison des paramètres physico-chimiques avec leurs recommandations (Tableau II).

Il dépend de trois facteurs: l'étendue (F1), la fréquence (F2) et l'amplitude (F3) comme le montre l'équation (1):

$$IQE=100-\left(\frac{\sqrt{F1^2+F2^2+F3^2}}{1.732}\right) \quad (1)$$

Le dénominateur 1,732 normalise la valeur résultante de l'IQE dans une fourchette de zéro (pire qualité) à 100 (meilleure qualité). La longueur du vecteur résultant peut atteindre 173,2 (Eq. (2)).

$$\sqrt{100^2+100^2+100^2}=173.2 \quad (2)$$

Ainsi, la division par 1,732 donne 100 comme longueur maximale du vecteur.

La portée (F1) représente l'étendue de la non-conformité de la qualité de l'eau par rapport à la ligne directrice au cours de la période d'intérêt (Eq. (3))

$$F1=\left(\frac{\text{Nombre de paramètre excédant la valeur guide}}{\text{Nombre total de paramètre}}\right) \times 100 \quad (3)$$

La fréquence (F2) représente la proportion en pourcentage des tests individuels qui sont non conformes (échec) aux directives respectives (Eq. (4))

$$F2=\left(\frac{\text{Nombre de donnée excédant la valeur guide}}{\text{Nombre total de données}}\right) \times 100 \quad (4)$$

L'amplitude (F3) représente l'amplitude qui est la mesure dans laquelle les tests non conformes (échoués) n'ont pas satisfait aux directives respectives (Eq. (5))

$$F3=\left(\frac{SNE}{0.01SNE+0.01}\right) \quad (5)$$

SNE est la Somme Normalisée des Excursions qui est le montant total par lequel les tests individuels ratés sont hors de conformité (Eq. (6))

$$SNE=\frac{\sum_{i=1}^n \text{excursion}_i}{\text{Nombre total de données}} \quad (6)$$

L'excursion est calculée de deux manières différentes, selon le type de ligne directrice. Lorsque la ligne directrice ne doit pas être dépassée, elle est calculée en utilisant (Eq. (7))

$$\text{excursion}_i=\left(\frac{\text{Valeur du paramètre excédant la valeur guide}-\text{Valeur guide}_j}{\text{Valeur guide}_j}\right) \quad (7)$$

Et pour les cas où la valeur ne doit pas tomber en dessous de la ligne directrice, l'excursion est donnée par l'équation (8)

$$\text{excursion}_i=\left(\frac{\text{Valeur guide}_i-\text{Valeur du paramètre excédant la valeur guide}_j}{\text{Valeur du paramètre excédant la valeur guide}_j}\right) \quad (8)$$

Tableau 2. Paramètres d'évaluation de la qualité des eaux de boisson avec les valeurs guides et limites

	Paramètres	Valeurs guides	Références
Chimiques	pH	6.5 – 8.5	[15]
	Turbidité (NTU)	5	[1]
	Température (°C)	25	[15]
	Oxygène dissous (mg.L ⁻¹)	5	[15]
	Solide totaux dissous (mg.L ⁻¹)	1000	[15]
	Ammonium (mg.L ⁻¹)	1	[15]
	Nitrites (mg.L ⁻¹)	3	[1]
	Nitrate (mg.L ⁻¹)	25	[15]
	Fer (mg.L ⁻¹)	0,3	[1]
	Manganèse (mg.L ⁻¹)	0,05	[1]
Microbiologiques	Coliformes totaux (ufc.100 m.L ⁻¹)	10	[1]
	Coliformes fécaux (ufc.100 m.L ⁻¹)	0	[1]
	Streptocoques fécaux (ufc.100 m.L ⁻¹)	0	[1]
	<i>Escherichia coli</i> (ufc.100 m.L ⁻¹)	0	[1]
	<i>Salmonella</i> (ufc.100 m.L ⁻¹)	0	[1]
	<i>Shigella</i> (ufc.100 m.L ⁻¹)	0	[1]

Selon le Conseil canadien des ministres de l'environnement [14], les valeurs de l'IQE ont été classées en cinq catégories et la qualité de l'eau à chaque station d'échantillonnage a été classée et interprétée selon les descriptions des côtes du Tableau III.

Tableau 3. Classification et usage possible de l'eau selon l'Indice de Qualité de l'Eau du CCME

Indice de qualité de l'eau (IQE)	Qualité de l'eau	Description
100 ≤ IQE ≤ 95	Excellente	Toutes les mesures sont toujours conformes aux directives (ne nécessite pas de traitement avant la consommation humaine)
94 ≤ IQE ≤ 80	Bonne	Les conditions s'écartent rarement des niveaux naturels ou souhaitables (nécessite des travaux de traitement mineurs avant la consommation humaine)
79 ≤ IQE ≤ 65	Satisfaisante	Les conditions s'écartent parfois des niveaux naturels ou souhaitables (eau potable raisonnable nécessitant un traitement préalable et conventionnel avant la consommation humaine)
64 ≤ IQE ≤ 45	Mauvaise	Les conditions s'écartent souvent des niveaux naturels ou souhaitables (eau polluée dont la potabilité est douteuse)
44 ≤ IQE ≤ 0	Impropres à la boisson	Les conditions s'écartent généralement des niveaux naturels ou souhaitables (eau hautement polluée inacceptable pour la consommation humaine)

2.3.2 ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

Les paramètres physico-chimiques et microbiologiques des eaux de puits et de forages ont été soumis à une analyse en composante principale (ACP) pour déterminer les différents processus intervenant dans la pollution de ces eaux souterraines. L'ACP définit les facteurs principaux dont la corrélation avec les variables permet une explication des phénomènes mis en jeu. C'est une méthode non supervisée, où aucune hypothèse n'est faite concernant des relations éventuelles entre les individus et entre les variables. Mais plutôt, une simple et raisonnable optimisation de l'hypothèse, selon laquelle les directions de plus grandes dispersions des échantillons sont les directions les plus intéressantes et que la variabilité associée avec ces directions correspond à l'information ([16], [17]). L'utilisation optimale de l'ACP nécessite la normalisation de la distribution des données, et celle-ci a été vérifiée par le test statistique HSD (Honest Significant Difference) de Tukey et de corrélation de Pearson. Ces analyses ont été réalisées avec le logiciel R interface Rstudio version 4.1.2.

3 RÉSULTATS

3.1 CARACTÉRISTIQUES ET QUALITÉS PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX DE FORAGE ET DE PUITS DE GRAND-BASSAM

La statistique descriptive de chaque paramètre physico-chimique est présentée dans le Tableau IV. Dans l'ensemble des eaux échantillonnées, la température varie de 28,8 à 29,9 °C au niveau des forages et de 27,94 à 30,2 au niveau des puits et les valeurs moyennes se situent entre 29,26 ± 0,51°C (forage) et 29,4 ± 0,59 °C (Puits). Quant au pH, les valeurs minimum et maximum sont respectivement 4,78 et 6,24 dans les eaux de forages et 5,96 et 7,29 dans les eaux de puits. Les valeurs moyennes sont comprises entre 5,5 ± 0,63 (forages) et 6,71 ± 0,34 (puits).

Les valeurs de l'oxygène dissous et du potentiel redox fluctuent respectivement entre 2,02 mg.L⁻¹ et 2,59 mg.L⁻¹ et entre 1,23 et 57,7 mV pour les eaux de forage et entre 1,80 et 4,36 mg.L⁻¹ et 6,05 et 69,5 mV pour les eau de puits. Les concentrations moyennes de l'oxygène dissous et du potentiel redox par ouvrage sont 2,25 ± 0,26 mg.L⁻¹ et 22,56 ± 20,6 mV dans les forages et de 2,86 ± 0,63 mg.L⁻¹ et 44,9 ± 18,8 mV dans les puits.

Les valeurs moyennes la turbidité, de la conductivité et des solides totaux dissous sont respectivement 17,19 ± 14,2 UNT, 183,2 ± 81,8 µS.cm⁻¹ et 91,6 ± 40,7 mg.L⁻¹ pour les eaux de forage et de 8,13 ± 6,44 UNT, 729 ± 468 µS.cm⁻¹ et 355 ± 239 mg.L⁻¹ pour les eaux de puits.

Concernant la salinité et l'absorbance UV₂₅₄, les valeurs dans les eaux de forage varient de 0,13 à 0,37 mg.L⁻¹ avec une moyenne de 0,20 ± 0,12 mg.L⁻¹ pour la salinité et de 0,46 à 1,38 cm⁻¹ avec une moyenne de 0,89 ± 0,42 cm⁻¹ pour l'absorbance. Celles des puits varient de 0,3 à 2,42 mg.L⁻¹ avec une moyenne de 0,88 ± 0,56 mg.L⁻¹ pour la salinité et de 0,049 à 0,93 cm⁻¹ avec une moyenne de 0,4 ± 0,2 cm⁻¹ pour l'absorbance.

Tableau 4. Statistique descriptive et de comparaison entre les paramètres physico-chimiques des eaux de forages et puits de Grand-Bassam

Paramètres	Valeurs guides ([1], [15])	Forage (n= 4)			Puits (n =17)			Test statistique: Kruskal-Wallis
		Min	Max	Moy ± σ	Min	Max	Moy ± σ	p-value
Température (°C)	25-30	28,8	29,9	29,26 ± 0,51	27,94	30,2	29,4 ± 0,59	0,370
pH	6,5-8,5	4,78	6,24	5,5 ± 0,63	5,96	7,29	6,71 ± 0,34	0,004
Oxygène dissous (mg.L ⁻¹)	5	2,02	2,59	2,25 ± 0,26	1,80	4,36	2,86 ± 0,63	0,06
Potentiel redox (mV)	40	1,23	57,7	22,56 ± 20,6	6,05	69,5	44,9 ± 18,8	0,127
Turbidité (UNT)	5	3,79	53,5	17,19 ± 14,2	1,23	31,1	8,13 ± 6,44	0,244
Solides totaux dessous (mg.L ⁻¹)	1000	58,3	147	91,6 ± 40,7	81	979	355 ± 239	0,007
Conductivité (µS.cm ⁻¹)	-	116	294	183,2 ± 81,8	202,1	1957	729 ± 468	0,004
Salinité (mg.L ⁻¹)	-	0,13	0,37	0,20 ± 0,12	0,3	2,42	0,88 ± 0,56	0,004
Absorbance UV ₂₅₄ (cm ⁻¹)	-	0,46	1,38	0,89 ± 0,42	0,049	0,93	0,4 ± 0,2	0,324
NH ₄ ⁺ (mg.L ⁻¹)	1,5	0,33	0,58	0,44 ± 0,12	0	2,88	0,78 ± 0,15	0,281
NO ₃ ⁻ (mg.L ⁻¹)	50	0	3,1	1,87 ± 1,44	2,1	34,5	12,2 ± 10	0,004
NO ₂ ⁻ (mg.L ⁻¹)	3	0	0,01	0,002 ± 0	0,013	0,29	0,08 ± 0,08	0,002
Mn ²⁺ (mg.L ⁻¹)	0,05	0,04	0,19	0,1 ± 0,07	0,001	0,23	0,07 ± 0,06	0,244
Fe ²⁺ (mg.L ⁻¹)	0,3	0,52	0,98	0,73 ± 0,23	0,004	0,47	0,11 ± 0,13	0,002

Les concentrations moyennes d'ammonium, de nitrates, de nitrite, du manganèse et de fer respectives de 0,44 ± 0,12 mg.L⁻¹, 1,87 ± 1,44 mg.L⁻¹ et 0,002 ± 0 mg.L⁻¹, 0,1 ± 0,07 mg.L⁻¹ et 0,73 ± 0,23 mg.L⁻¹ pour les eaux de forage et de 0,78 ± 0,15 mg.L⁻¹, 12,2 ± 10 mg.L⁻¹, 0,08 ± 0,08 mg.L⁻¹, 0,07 ± 0,06 mg.L⁻¹ et 0,11 ± 0,13 mg.L⁻¹ dans les eaux de puits ont été obtenues.

Les résultats des tests de Kruskal-Wallis (Tableau IV) indiquent qu'aucune différence significative (p > 0,05) n'est observée entre les valeurs médianes de la température, de l'oxygène dissous, du potentiel redox, de la turbidité, de l'absorbance UV₂₅₄, de l'ammonium et du manganèse des eaux de forages et de puits. En revanche, une différence significative (p < 0,05) existe entre les valeurs médianes du pH, de la conductivité, des solides totaux dissous, de la salinité, des nitrites et nitrates et du fer des eaux de forage et de puits.

Selon les tests de Mann-Whitney, les valeurs medianes du pH, de la conductivité, des solides totaux dissous, de la salinité, des nitrites et nitrates des eaux de puits sont significativement plus élevées (p < 0,05) que celle des eaux de forage (Figure 2A, B, C, D, E, F). Pa contre, les teneurs en fer sont significativement plus élevées (p < 0,05) dans les eaux de forage que celles des puits (Figure 2G).

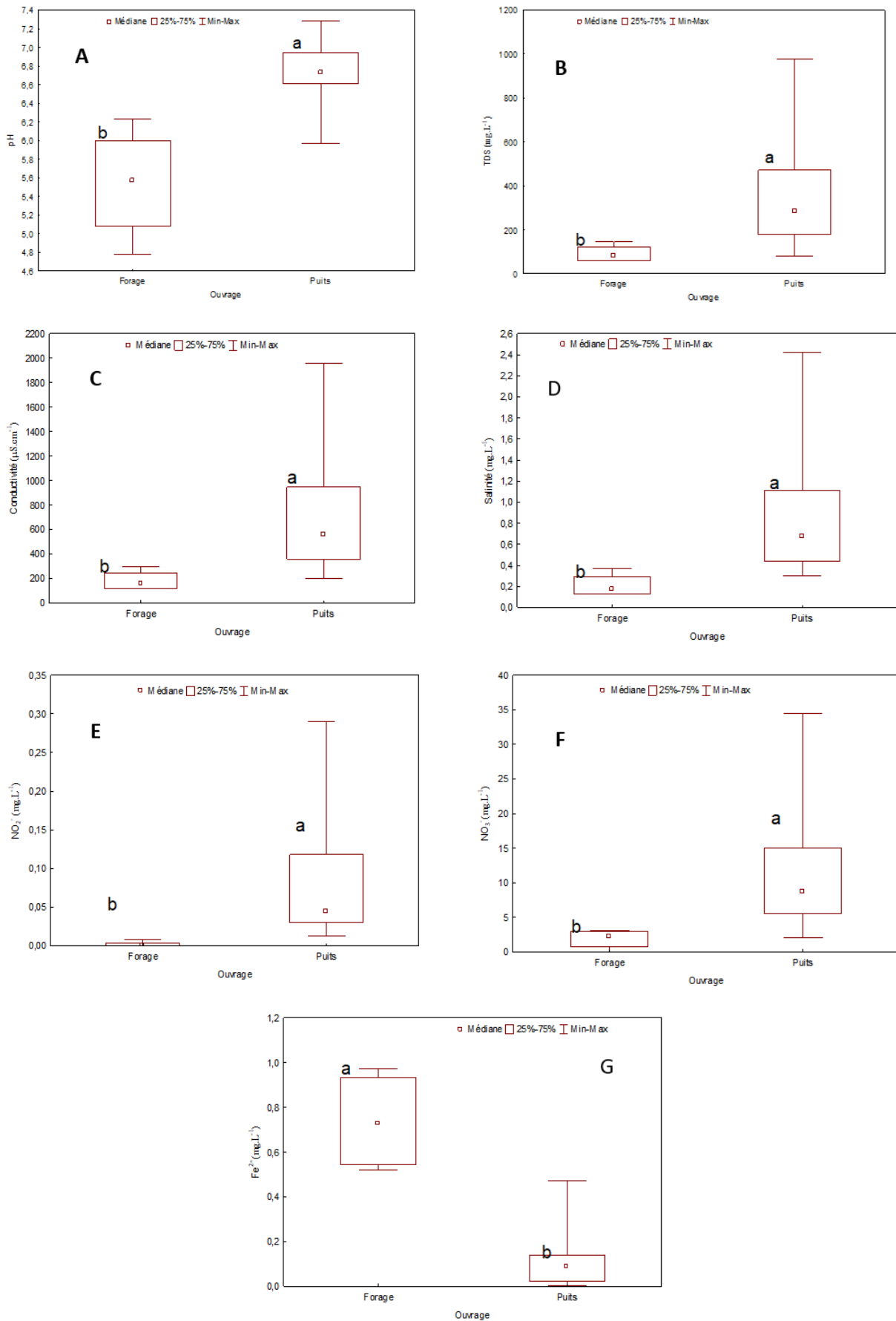


Fig. 2. Variation du pH (A), des solides totaux dissous (B), de la conductivité (C), de la salinité (D), du nitrite (E), du nitrate (F) et du fer (G) dans les eaux de forages et de puit de Grand-Bassam

La qualité chimique de l'eau de tous les forages (100 %) pendant la période d'étude est classée comme non potable. Pour les eaux de puits, plus de la moitié des eaux (65 %) ont une qualité satisfaisante et 35 % sont de mauvaise qualité (Figure 3).

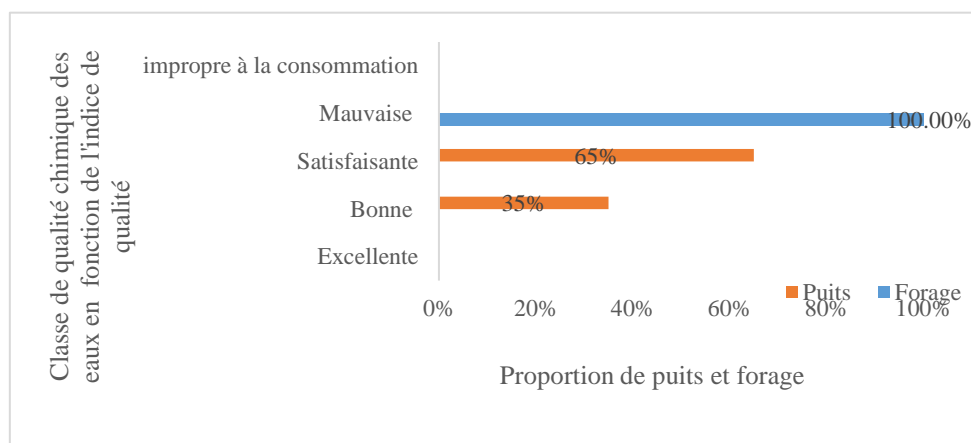


Fig. 3. Répartition des forages et puits en fonction des classes de qualité chimique des eaux de Grand-Bassam

3.1.1 CARACTÉRISTIQUES ET QUALITÉS MICROBIOLOGIQUES DES EAUX DE FORAGE ET DE PUIITS DE GRAND-BASSAM

Le Tableau V présente les charges moyennes bactériennes énumérées dans les eaux de forage et puits de Grand-Bassam. Dans les forages, les valeurs moyennes de coliformes totaux de 900 ± 200 ufc.100 mL⁻¹, de coliformes fécaux de 307 ± 300 ufc.100 mL⁻¹, de *Escherichia coli* de 75 ± 60 ufc.100 mL⁻¹, de streptocoques fécaux de 215 ± 201 ufc.100 mL⁻¹, de *Salmonella* de 50 ± 24 ufc.100 mL⁻¹ et de *Shigella* de 0 ± 0 ufc.100 mL⁻¹ ont été obtenues.

Dans les puits, elles sont de 899 ± 309 ufc.100 mL⁻¹ pour les coliformes totaux, de 367 ± 291 ufc.100 mL⁻¹ pour les coliformes fécaux, de 112 ± 110 ufc.100 mL⁻¹ pour les *Escherichia coli*, de 90 ± 68 ufc.100 mL⁻¹ pour les streptocoques fécaux, de 13 ± 9 ufc.100 mL⁻¹ pour les *Salmonella* et de 0 ± 0 ufc.100 mL⁻¹ pour les *Shigella*.

Le test de Kruskal Wallis (Tableau V) a révélé qu'aucune différence significative ($p > 0,05$) n'existe entre les valeurs médianes des coliformes totaux et fécaux, des *Escherichia coli*, des streptocoques fécaux et des *Salmonella*. En revanche, les charges médianes des *Shigella* varient significativement ($p = 0,00$) entre les eaux de forage et de puits.

Le test de Mann-Whitney montre que les charges de *Shigella* sont plus élevées dans les eaux de forage que dans celles des puits (Figure 4).

Tableau 5. Statistique descriptive et de comparaison entre les paramètres microbiologiques des eaux de puits et forages de Grand-Bassam

Paramètres	Valeurs guides ([1], [15])	Forage (n= 4)			Puits (n =17)			Test statistique: Kruskal-Wallis p-value
		Min	Max	Moy $\pm \sigma$	Min	Max	Moy $\pm \sigma$	
Coliformes totaux (ufc.100 m.L ⁻¹)	10	600	1000	899 ± 309	270	1360	900 ± 200	0,527
Coliformes fécaux (ufc.100 m.L ⁻¹)	0	60	790	307 ± 300	0	870	367 ± 291	0,560
<i>Escherichia coli</i> (ufc.100 m.L ⁻¹)	0	0	90	75 ± 60	0	320	112 ± 110	0,716
Streptocopes fécaux (ufc.100 m.L ⁻¹)	0	30	600	215 ± 201	0	190	90 ± 68	0,418
<i>Salmonella</i> (ufc.100 m.L ⁻¹)	0	1	100	50 ± 24	0	30	13 ± 9	0,438
<i>Shigella</i> (ufc.100 m.L ⁻¹)	0	0	20	11 ± 4	0	0	0 ± 0	0,000

La Figure 5 présente les différentes classes de qualité microbiologique des eaux de puits et de forage. Elle indique que la majorité des eaux de forages (90,53 %) et de puits (92 %) sont non potable et de mauvaise qualité contre seulement 8 % des eaux de puits et 9,47 des eaux de forage qui sont de bonne qualité.

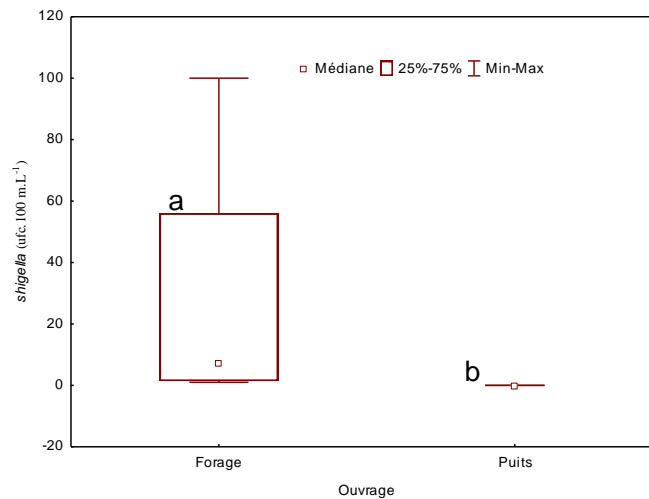


Fig. 4. Variation de shigella dans les eaux de forage et de puit de Grand-Bassam

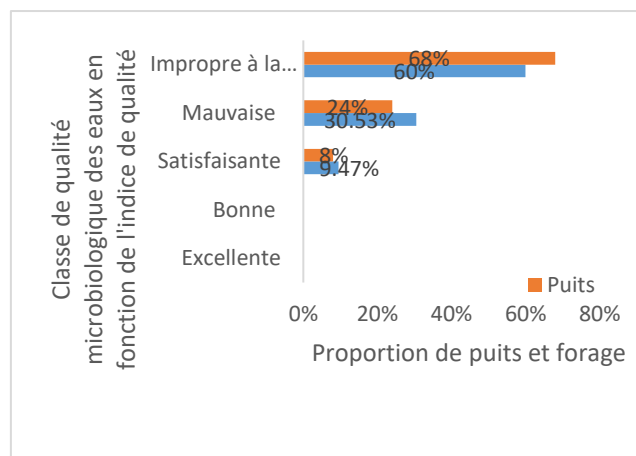


Fig. 5. Répartition des forages et puits en fonction des classes de qualité microbiologique des eaux de Grand-Bassam

3.2 ORIGINE DE LA POLLUTION CHIMIQUE ET MICROBIOLOGIQUE DES EAUX DE FORAGES ET DE PUIITS

L'analyse en composantes principales (ACP) réalisée sur les paramètres physico-chimiques et bactériologiques (variables) a permis de mettre en évidence le pourcentage de variance de trois facteurs (Tableau VI). Les deux premiers facteurs F1, F2 retenus pour l'analyse, cumulent 49,45% de la variance totale avec 32,78 % pour le facteur F1 et 16,67 % pour le facteur F2. La liaison existante entre toutes les variables prises deux à deux et les coefficients de corrélation entre ces différentes variables sont donnés par la matrice de corrélation (Tableau VII).

Tableau 6. Valeurs propres et variances des eaux forages et puits

Facteur	F1	F2	F3
Valeur propre	6,56	3,33	1,86
% de variance exprimée	32,78	16,66	9,33
Cumul de valeur propre	6,56	9,89	11,75
% de variance exprimée cumulé	32,78	49,44	58,74

La projection des variables sur le plan factoriel illustrée par la Figure 6a met en évidence trois grands regroupements des paramètres étudiés dans les eaux de puits et de forage. Le premier groupe (G1) se situe dans la partie négative de l'axe F1 et englobe les puits P1, P2 et P3 et les forages F1, F2, F3 et F4. Il est caractérisé par les streptocoques fécaux, *salmonella*, *shigella*, l'absorbance UV254, la turbidité, le fer, le manganèse (Figure 6b).

Le deuxième regroupement (GII) est observé du côté positif de l'axe factoriel F1 en compte les conductivité, solides totaux dissous, température, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , potentiel redox, salinité, *E.coli*, coliformes totaux et fécaux. Les puits P4, P5, P6, P7, P8, P12 et P13 appartiennent à ce groupe.

Le troisième groupe (GIII) est dans la partie positive de l'axe factoriel 2 et est constitué de pH et oxygène dissous. Il enregistre les puits P9, P10, P11, P14, P15, P16 et P17.

Tableau 7. Matrice de corrélation entre les paramètres chimiques et microbiologiques étudiés

	CT	CF	<i>E.coli</i>	SF	<i>salm</i>	<i>shig</i>	pH	T	Turb	STD	Sali	Cond	OD	Redox	Abs ₂₅₄	NH_4^+	NO_3^-	NO_2^-	Mn^{2+}	Fe^{2+}	
CT	1																				
CF	-0	1																			
<i>E.coli</i>	-0,33	0,48	1																		
SF	0,34	-0,2	-0,2	1																	
<i>Salm</i>	0,03	-0,2	-0,2	0,44	1																
<i>Shig</i>	-0,36	0,09	-0,1	-0,1	0,5	1															
pH	0,17	-0	-0,2	-0,6	-0,7	-0,43	1														
T	-0,05	0,03	-0,1	-0	0,12	0,2	-0,1	1													
Turb	0,35	-0,1	-0,2	0,71	0,61	-0,11	-0,5	-0,04	1												
STD	-0,01	0,36	-0	-0,3	-0,3	-0,26	0,45	0,171	-0,21	1											
Sali	-0	0,29	-0	-0,3	-0,3	-0,28	0,47	0,194	-0,23	0,99	1										
Cond	-0,02	0,33	-0	-0,3	-0,4	-0,27	0,47	0,197	-0,24	0,99	0,99	1									
OD	-0,1	-0	0,02	-0,3	0,01	-0,09	0,32	-0,01	-0,24	0,02	0,05	0,07	1								
Redox	-0,12	-0,3	-0,2	0,21	-0,3	-0,28	0,04	-0,04	-0,12	0,17	0,16	0,19	0,09	1							
Abs ₂₅₄	-0,01	-0,1	0,26	0,5	0,4	0,1	-0,7	-0,14	0,55	-0,3	-0,37	-0,36	-0,4	-0,1	1						
NH_4^+	0,05	0,43	-0,1	-0,2	-0,2	-0,09	0,25	0,007	0	0,78	0,75	0,76	-0,2	-0	-0,1	1					
NO_3^-	-0,03	0,24	-0,1	-0,2	-0,3	-0,19	0,32	0,165	-0,21	0,7	0,71	0,71	-0,1	0,34	-0,4	0,67	1				
NO_2^-	0,01	0,4	0,11	-0,1	-0,2	-0,23	0,32	0,14	-0,18	0,66	0,65	0,66	0,38	0,25	-0,3	0,42	0,64	1			
Mn^{2+}	0,3	0,37	0,14	0,38	0,36	-0,11	-0,3	-0,05	0,51	0,22	0,18	0,19	-0,2	-0,1	0,42	0,4	-0,1	0,13	1		
Fe^{2+}	-0,1	0,24	0,46	0,24	0,31	0,29	-0,6	-0,04	0,21	-0,4	-0,4	-0,41	-0,4	-0,5	0,58	-0,08	-0,49	-0,47	0,38	1	

CT: coliformes totaux, CF: coliformes fécaux, *E.coli*: Escherichia coli, SF: streptocopes fécaux, *salm*: salmonella, *Shig*: shiguelia, T: température, Turb: turbidité, STD: solides totaux dissous, Sali: salinité, Cond: conductivité, Abs254: absorbance UV254

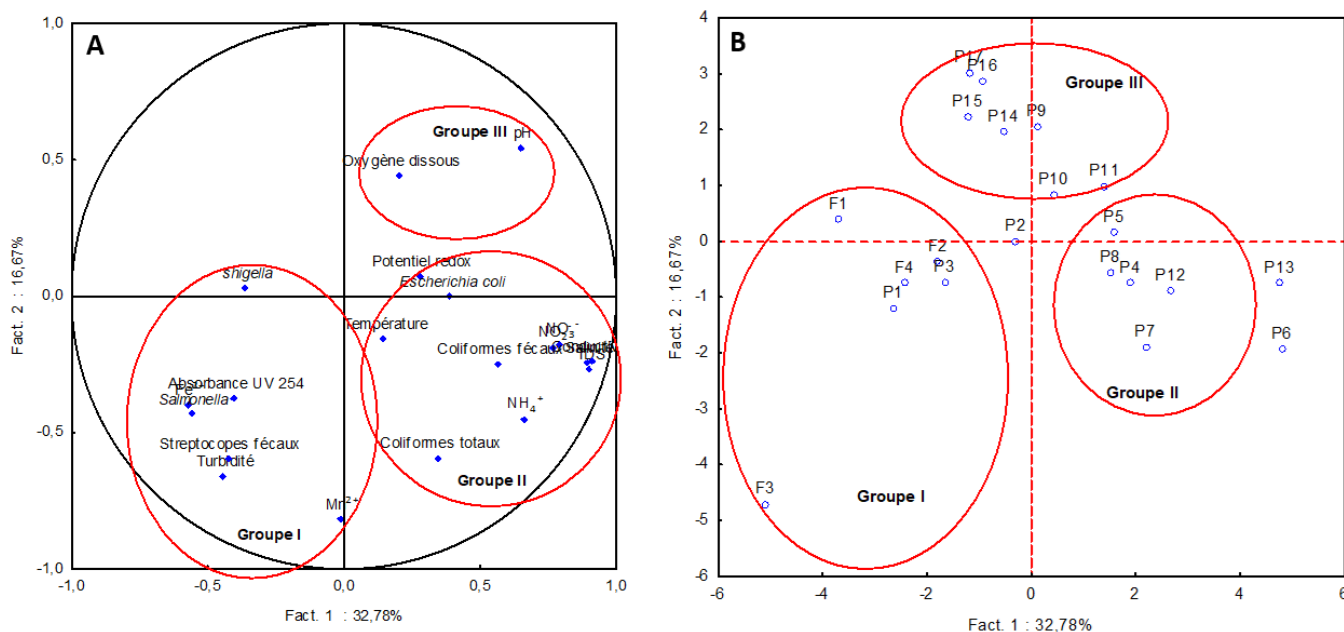


Fig. 6. Cercle de corrélation des variables (A) et plan factoriel des paramètres physico-chimiques en fonction des stations (B)

4 DISCUSSION

4.1 QUALITÉ CHIMIQUE ET MICROBIOLOGIQUE DES EAUX DE PUIITS ET FORAGES DE GRAND-BASSAM

Les résultats des analyses chimiques montrent que les eaux de puits et forages sont acides et chaudes. L'acidité des eaux souterraines en zone tropicale humide est principalement liée à la production de CO_2 dans les premières couches du sol. L'hydratation du CO_2 produit de l'acide carbonique (H_2CO_3) dont l'ionisation donne des ions H^+ qui sont à l'origine de l'acidité des eaux. Cette acidité de l'eau souterraine de la zone est en conformité avec les résultats de [18] qui ont travaillé sur les eaux souterraines et ont obtenu des valeurs de pH comprises entre 4,2 et 6,88 dans la ville de Bonoua, proche de Grand-Bassam.

Les températures moyennes des eaux de puits et forages supérieures à 28°C pourraient favoriser la croissance de certains micro-organismes dans l'eau [1]. Concernant l'oxygène dissous, les eaux de puits présentent une meilleure oxygénation que les eaux de forages. Ce fait peut être lié au contact des eaux de puits avec l'air ambiant dû à leurs faibles profondeurs. En effet, le niveau d'eau moyen par rapport au sol dans les puits de $11,53 \pm 2,77$ m qui est inférieur à $16,45 \pm 5,02$ m, valeur enregistrée dans les forages. Selon [19], plus l'eau est peu profonde, plus la concentration de l'oxygène dissous est élevée.

Par ailleurs, la valeur moyenne du potentiel redox des eaux de forage de $22,56 \pm 20,6$ mV, inférieure à 40 mV, indique que le milieu est réducteur. La salinité élevée des eaux de puits pourrait être liée à l'environnement côtier. En effet, Grand-Bassam étant située à la périphérie de l'océan atlantique, une communication pourrait être facilitée entre les eaux salines et la nappe phréatique et contribuerait à augmenter la conductivité de eaux de puits. Les valeurs élevées de l'absorbance UV_{254} enregistrées dans les eaux de forages indiquent qu'elles contiennent plus de matières organiques que les eaux de puits.

Toutes les eaux de forages sont non potables et 65 % des eaux de puits ont une qualité satisfaisante au niveau chimique. Ce résultat indique que les paramètres de qualité de l'eau s'écartent généralement des directives de qualité de l'eau pour l'usage domestique et est en accord avec celui de [20] ayant mis en évidence la pollution chimique des eaux de puits et forage de la zone du canal de Vridi proche de Grand-Bassam. L'altération de la qualité chimique des eaux de forage est liée aux concentrations élevées de fer et de manganèse obtenues dans celles-ci. Ces eaux sont impropres à la consommation humaine et aux autres usages domestiques. En revanche, des eaux de puits de bonne qualité représentant 35 % de l'ensemble des eaux ont été observées. Cela signifie que les paramètres de qualité s'écartent rarement des niveaux naturels ou souhaitables et nécessite des travaux de traitement mineurs avant la consommation humaine. Des eaux de puits de bonne qualité chimique ont été enregistrées à Agboville par [21].

Par ailleurs, la majorité des eaux de puits (92%) et de forages (90,5%) présentent une mauvaise qualité microbiologique. Toutefois, les plus fortes charges des coliformes totaux ont été observées dans les eaux de puits et celles de *Salmonella* et de *Shigella* sont enregistrées dans les forages. Ces indicateurs de pollution fécale des eaux pourraient provenir des eaux d'infiltration des fosses septiques et du ruissellement des eaux usées compte tenu des faibles profondeurs des ouvrages. De fortes charges de coliformes totaux ont également été observées par [21] dans les eaux de puits d'Agboville.

4.2 ORIGINE DE LA POLLUTION CHIMIQUE ET MICROBIOLOGIQUE DES EAUX DE FORAGES ET DE PUIITS

Le groupe I englobe les puits P1, P2 et P3 et les forages F1, F2, F3 et F4. Les eaux de ce groupe sont caractérisées par les fortes valeurs de streptocoques fécaux, *salmonella*, *shigella*, absorbance UV_{254} , turbidité, fer et manganèse. Les fortes teneurs de fer et de manganèse dans ces eaux suggèrent qu'elles sont pauvres en oxygène dissous et sont donc des milieux réducteurs favorable à la libération de ces ions [22]. Leurs présences peuvent être à l'origine de l'aspect trouble des eaux. La corrélation entre la turbidité et le manganèse ($r = 0,51$) justifierait ce fait. La coloration rougeâtre de l'eau de certains forages et puits pourrait provenir de la réduction du fer. Le fer et le manganèse confèrent à l'eau un goût métallique désagréable entraînant ainsi un problème d'acceptabilité de l'eau par les populations. Le caractère réducteur des eaux de forages peut être lié aux fortes charges des *salmonella* de ces eaux. En effet, les *salmonella* produisent de l'hydrogène sulfuré (H_2S) par l'activité de la cystéine désulfhydrase qui nécessite la consommation de grandes quantités de O_2 par ces bactéries. Cette activité a pour conséquence l'asphyxie du milieu et confère une mauvaise odeur à l'eau. Ce phénomène pourrait expliquer le faible taux de O_2 et la mauvaise odeur des eaux de forages. La présence des streptocoques témoigne d'une pollution ancienne des eaux par la matière fécale. La matière fécale pourrait provenir des eaux des fosses septiques [1]. Une communication latérale entre les forages et les fosses septiques pourrait bien exister. Par ailleurs une corrélation positive ($r = 0,5$) est observée entre les *Salmonella* et les *Shigella* qui n'existe que dans les eaux de forages. Ce lien justifierait que ces bactéries pathogènes dans les eaux de forage ont la même origine. La corrélation de 0,55 entre l'absorbance UV_{254} et la turbidité révèle que ces eaux contiennent des substances organiques responsable de la coloration des eaux [23]. Ces eaux pourraient également contenir des substances nutritives pouvant augmenter le taux de croissance des bactéries [24]. La corrélation entre la turbidité et les streptocoques fécaux justifie donc cette hypothèse. Le Fer et l'absorbance UV_{254} sont faiblement corrélés positivement ($r = 0,58$).

Le deuxième groupe caractérisé par les valeurs élevées de conductivité, STD, température, NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , potentiel redox, salinité, coliformes totaux et fécaux et *E.coli* comprend les puits P4, P5, P6, P7, P8, P12 et P13. Les eaux des puits constituant uniquement ce groupe sont plus minéralisées (forte corrélation positive $r = 0,99$ entre conductivité et TDS et la salinité) oxygénées et chaudes. Des conductivités élevées dans les eaux des altérites pourraient être liées aux phénomènes de pollution chimique et microbiologique [25]. La forte présence des

indicateurs de pollution chimiques tels les nitrates, les nitrites et l'ammonium et celle d'indicateurs de pollution microbiologique tels *E.coli*, coliformes totaux et fécaux dans les eaux de puits de ce groupe témoins d'une pollution récente et d'origine humaine [26] justifierait cette hypothèse. Les fortes corrélations de ces indicateurs de pollution azotée avec la conductivité (NH_4^+ : $r = 0,76$; NO_3^- : $r = 0,7$; NO_2^- : $r = 0,68$) et la salinité (NH_4^+ : $r = 0,75$; NO_3^- : $r = 0,71$; NO_2^- : $r = 0,66$) illustrées par les coefficients de Pearson renforceraient donc cette hypothèse. Les valeurs élevées de potentiel redox révèlent un milieu oxydant normal favorisant la réalisation des réactions d'oxydation.

Le troisième groupe est caractérisé par les fortes valeurs de pH et d'oxygène dissous. Il enregistre les puits P9, P10, P11, P14, P15, P16 et P17. Ces eaux sont peu acides et bien oxygénées. L'oxygénation de ces eaux de puits peut être due à la faible profondeur et température de ces eaux. En effet, une masse d'eau à basse température peut contenir plus d'oxygène dissous car les molécules d'oxygène bougent moins. Plus l'eau est peu profonde, plus la concentration d'oxygène dissous est élevée. La forte corrélation négativement du pH aux *Salmonella* ($r = -0,7$) et absorbance UV_{254} ($r = -0,7$) et sa faible corrélation à la turbidité ($r = -0,5$), au fer ($r = -0,6$) et aux streptocoques fécaux ($r = -0,6$) indique que ces paramètres corrélés au pH enregistrent de faibles valeurs dans les eaux de ces puits. Ces eaux présentent une bonne qualité chimique.

5 CONCLUSION

L'analyse physico-chimique et bactériologique des eaux de forages et de puits de Grand-Bassam a révélé que l'ensemble des eaux de forage présente une mauvaise qualité chimique contrairement à celles des puits dont la majorité est de qualité satisfaisante. En revanche, la qualité microbiologique des eaux de forage comme celles des puits est majoritairement mauvaise. La pollution bactériologique est d'origine fécale et proviendrait des eaux usées des fosses septiques.

REFERENCES

- [1] OMS Directives de qualité pour l'eau de boisson : 4 e éd. Intégrant le premier additif [Guidelines for drinking-water quality: 4th ed. incorporating first addendum]. Genève: Licence : CC BY-NC-SA 3.0 IGO, 539p, 2017.
- [2] OMS, UNICEF Progrès en matière d'alimentation en eau et d'assainissement : rapport 2017. ISBN 978-92-4-251289-2 Classification NLM: WA 670, 116 p, 2017.
- [3] M.R. Kouassi, R. Koné, Y.E. Kouakou, B. Silué, G. Cissé, N. Soro, "Approvisionnement en eau potable, qualité de la ressource et risque sanitaire associés à Korhogo (Nord-Côte d'Ivoire)", Environnement Risque et Santé, vol.14 pp 230-241, 2015. doi : 10.1684/ers.2015.0781.
- [4] A. N. B. Kouadio, K. J. T. Koffi, K. O. Kra, D. L. Goné, "Risque de diarrhée infectieuse associée à la consommation des eaux de puits traditionnels d'Agboville (Côte d'Ivoire)" Journal of Applied Science and Environmental Studies, vol.2, no 4, pp186-199, 2019.
- [5] A. N. B. KOUADIO, K. M. YEO, A. KOUADIO, D. L. GONÉ, "Spatial and temporal variations of nitrates in traditional urban shallow well water of Sub-Saharan Africa: the case study of Agboville, Ivory Coast", Journal of Materials and Environmental Sciences, Vol.11, no 3, pp476-485, 2020.
- [6] S. Shrestha, F. Kazama, "Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: a case study of the Fuji river basin". Japan. Environ. Model. Softw. 22 (2007) 464–475.
- [7] S.M. Yidana, "Groundwater classification using multivariate statistical methods: southern Ghana." J. Afr. Earth Sci. 57 (2010) 455- 469
- [8] M. K. Miyittah, S. K. Tulashie, F. W. Tsyawo, J. K. Sarfo, A. A. Darko, "Assessment of surface water quality status of the Aby Lagoon System in the Western Region of Ghana." Heliyon 6 -2020) e04466.1-9 <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04466>
- [9] G H. Cavalcante, F Vieira, M. Abouleish, S. Atabay, E. Campos, R. Bento, "Environmental aspects of semi-closed lagoons in the Sharjah coastline during spring/ neap tides, southern Arabian/Persian Gulf coast." Regional Studies in Marine Science 46 (101896) (2021) 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101896>
- [10] M.Valentini, G. B. Dos Santos, B.M. Vieira, "Multiple linear regression analysis (MLR) applied for modeling a new WQI equation for monitoring the water quality of Mirim Lagoon, in the state of Rio Grande do Sul-Brazil". SN Applied Sciences 3 (2021)70 <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04005-1>
- [11] S. Guillaume, K. ODOUKPE, K Hilaire, K.B. YAO, P. K. KOUADIO, M. E. KONAN, " Dynamique du peuplement des Oiseaux d'une riziculture et ses environs dans la zone humide d'importance internationale de Grand-Bassam ". Journal of Applied Biosciences vol.79, PP6909 – 6925, 2014
- [12] L. M.C Akadje, A.Kangah, B. G. BOUSSOUGOU, A. C. Hauhouot, Y. Brou, "Modélisations prospectives de l'occupation du sol d'une zone a forte pression anthropique : cas du site Ramsar de Grand-Bassam, (SUD-EST de la COTE D'IVOIRE) ". Cahiers du Centre Béninois de la Recherche Scientifique et de l'Innovation, vol.11, pp11-33, 2017
- [13] S.K. Pradhan, D. Patnaik, S.P. Rout, "Water quality index for the ground water in and around a phosphatic fertilizer plant". Indian J. Environ. Protect. 21 (2001) 355–358.
- [14] CCME, "Canadian water quality guidelines for the protection of aquatic life: CCME water quality index 1.0. Technical Report. In: Canadian Environmental Quality Guidelines, 1999. Canadian Council of Ministers of the Environment". Winnipeg. Winnipeg. (2001).

- [15] MSHP-MEF. "Arrêté interministériel du ministère de la santé et d'hygiène publique et le ministère des eaux et forêt de Côte d'Ivoire sous le n°168 du 03 aout 2020 fixant les normes de potabilité de l'eau destinée à la consommation humaine et les eaux brutes de surface en Côte d'Ivoire", 17 p. (2020)
- [16] L. Lebart, A. Morineau, M. Pirlou. "L'Analyse en Composantes Principales : Statistiques exploratoires multidimensionnelles", Dunod, Bordas, Paris, 32-33 (1995).
- [17] L. Eriksson, E. Johansson, N. Kettaneh-Wold, S. Wold. "Multi- and Megavariate Data Analysis. Part I – basic principles and applications". Umetrics AB, Umea, Sweden. (2001) 1-527.
- [18] L. O. Blé, G. E. Ake, T. Soro, Y. E Kouadio. "Evaluation de la qualité hydrochimique des eaux souterraines de la région de Bonoua (Sud-Est de la Cote d'Ivoire)". International Journal of Innovation and Applied Studies. Volume 14 (4) : 896-907 (2016).
- [19] J. Rodier. L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. Dunod, 9 ème édition, Paris, pp 1579 (2009)
- [20] G. A Douagui. "Risques de pollution de la nappe du Quaternaire de la zone sud du District d'Abidjan : cas du secteur Canal de Vridi Grand-Bassam (Côte d'Ivoire). Thèse unique de doctorat Université Nangui Abrogoua, Abidjan, Côte d'Ivoire", 202 p (2012).
- [21] A.N.B. Kouadio. "Evaluation du risque sanitaire lié à la consommation des eaux de puits traditionnels par les ménages à faibles revenus en milieu urbain : cas de la ville d'Agboville (Cote d'Ivoire)". Thèse unique de doctorat, Université NANGUI ABROGOUA, Abidjan, (Côte d'Ivoire), 184p (2019).
- [22] D. L. Goné, Y. A N'go, I. Savané, M. M. Goblé. "Potentialités en eaux souterraines des aquifères fissurés de la région d'agboville (Sud-Ouest de la côte d'Ivoire) : Caractérisation hydroclimatique et physique". Afrique Science, 1 (1) : 127-144. (2005)
- [23] J. Jia-qian, G. Nigel, A. Cécile, H. k. Geoff, B.Nigel. "Laboraty study of electro-couglatio-floculation for water treatment". Water Research n° 36, pp4064-4078 (2002)
- [24] T. M. Nola, T. Njiné, N. Kemka, T. Zébazé, S.H. Servais. "Transfert des bactéries fécales vers une nappe phréatique à travers une colonne de sol en région équatoriale : influence de la charge en eau appliquée en surface". Rev.Scis. Eau.19 (2) : 101-112. (2006)
- [25] J.Asslouj, S. Kholtei, N. Amrani. A Hilali. "Impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines de la communauté Mzamza (Chaouia, Maroc)". J.Wat. Sci. 20 (3) : 309-321. (2000)
- [26] F. Karim, M. Rafi. "Drinking water in the hilly region of Bangladesh. How is the quality?". Wat res devel, pp439-452 (2002).