

Evaluation de la Contamination Chimique des Eaux Souterraines par les Activités Anthropiques : Cas de la Zone d'Ity-Floleu Sous-Préfecture de Zouan-Hounien, Ouest de la Côte d'Ivoire

*Gbamélé Kouassi Serge,
Konan Kouakou Séraphin,
Kouassi Kouakou Lazare,
Brou Loukou Alexis,*

Laboratoire de Geosciences et Environnement,
Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa, Côte d'Ivoire

*Konan Koffi Félix,
Bini Kouamé Dongui,*

Laboratoire d'Ecologie, Biodiversité et Evolution,
Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa, Côte d'Ivoire

Doi:10.19044/esj.2020.v16n6p247

[URL:http://dx.doi.org/10.19044/esj.2020.v16n6p247](http://dx.doi.org/10.19044/esj.2020.v16n6p247)

Résumé

L'objectif de cette étude vise à évaluer la qualité saisonnière des eaux souterraines afin d'expliquer l'origine de leur pollution dans le département Zouan-Hounien. Les paramètres physico-chimiques in situ (température, conductivité, total des sels dissous, salinité, pH, potentiel redox, turbidité et oxygène dissous), les concentrations en éléments nutritifs (NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺, PO₄³⁻, SO₄²⁻), majeurs (Ca, Fe, K, Mg, Mn et Na) et traces (As, Cd, Cu, Ni, Pb et Zn) ont été mesurés sur deux années successives. Les analyses physico-chimiques faites avec un multiparamètre montrent que les eaux sont acides avec un pH moyen de 4,96 en saison sèche et de 4,14 en saison pluvieuse; la conductivité électrique moyenne est de 78,14 µS.cm⁻¹ en saison sèche et 48,43 µS.cm⁻¹ en saison pluvieuse. La turbidité avec une valeur moyenne de 4,14 NTU en saison sèche et de 29 NTU en saison pluvieuse affecte beaucoup la qualité de ces eaux de consommation surtout en saison pluvieuse. Les teneurs en nitrates dans toutes les stations ne respectent pas les normes OMS en toute saison et celles des phosphates pendant la saison sèche. Les concentrations de Fe et du Pb sont généralement supérieures aux normes OMS alors que celles des autres éléments le sont parfois. Le calcul de l'indice de qualité (WQI) a montré que pendant la saison sèche 85,7% des eaux étudiées sont impropre à la boisson et pendant la saison pluvieuse 28,6%. Les

analyses en Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) et en composante principale (ACP) montrent que la pollution est due aux activités anthropiques.

Mots clés: Activité Minière, Bassin Versant Cavally, Eaux Souterraines, Pollution, Variation Saisonnière

Evaluation of the Chemical Contamination of Groundwater by Anthropic Activities : Case of the Ity-Floleu Zone Sub-Prefecture of Zouan-Hounien, Western Côte d'Ivoire

*Gbamele Kouassi Serge,
Konan Kouakou Seraphin,
Kouassi Kouakou Lazare,
Brou Loukou Alexis,*

Laboratoire de Geosciences et Environnement,
Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa, Côte d'Ivoire

*Konan Koffi Felix,
Bini Kouame Dongui,*

Laboratoire d'Ecologie, Biodiversité et Evolution,
Université Jean Lorougnon Guédé, Daloa, Côte d'Ivoire

Abstract

The objective of this study is to assess the seasonal quality of groundwater in order to explain the origin of its pollution in the Zouan-Hounien department. In-situ physico-chemical parameters (temperature, conductivity, total dissolved salts, salinity, pH, redox potential, turbidity and dissolved oxygen), nutrient concentrations (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , SO_4^{2-}), major (Ca, Fe, K, Mg, Mn and Na) and traces (As, Cd, Cu, Ni, Pb and Zn) were measured over two successive years. The physico-chemical analyses made with a multiparameter show that the waters are acidic with an average pH of 4.96 in the dry season and 4.14 in the rainy season; the average electrical conductivity is $78.14 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ in the dry season and $48.43 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ in the rainy season. Turbidity with an average value of 4.14 NTU in the dry season and 29 NTU in the wet season greatly affects the quality of this drinking water, especially in the wet season. Nitrate levels in all stations do not meet WHO standards in all seasons and phosphate levels in the dry season. The

concentrations of Fe and Pb are generally higher than WHO standards, while those of other elements are sometimes higher. Calculation of the quality index (WQI) showed that during the dry season 85.7% of the water studied is unfit for drinking and during the rainy season 28.6%. The analyses in Ascending Hierarchical Classification (AHC) and Principal Component Analysis (PCA) show that the pollution is due to anthropogenic activities.

Keywords: Cavally Watershed, Groundwater, Mining Activity, Pollution, Seasonal Variation

Introduction

L'eau est indispensable à l'homme, aux animaux et aux plantes (Degbey *et al.*, 2010). Cependant, ceci n'implique pas que cette eau soit en qualité et en quantité suffisante ni d'un accès facile. L'accès à l'eau potable demeure une préoccupation dans la plupart des pays du monde (Kelome *et al.*, 2014). En 2017, l'OMS a estimé qu'à l'échelle mondiale 2,1 milliards de personnes, soit 30% de la population mondiale, n'ont toujours pas accès à des services d'alimentation domestique en eau potable, et principalement dans les pays en voie de développement (Rodier *et al.*, 2009). En Afrique subsaharienne, le taux de couverture de l'approvisionnement en eau potable est de 40 % (OMS, 2016). Le seuil acceptable pour la consommation d'eau par jour et par personne est estimé par la Banque Mondiale en 2004 à 100 litres. Mais, dans les pays en voie de développement, la consommation réelle par jour et par personne est très souvent en dessous de cette estimation (Ahonon, 2011). L'importance de l'eau et en particulier des eaux souterraines n'est pas à démontrer. Les eaux souterraines constituent une provision d'eau potable inestimable pour l'humanité (Belhadj *et al.*, 2018). Les eaux souterraines sont devenues la principale source d'approvisionnement en eau des secteurs domestique, industriel et agricole de nombreux pays (Ghislain *et al.*, 2012). En Côte d'Ivoire, comme dans la plupart des pays africains, le problème de l'accès à l'eau potable se pose aussi avec acuité. Cet état de choses amène les populations à se préoccuper plus de l'accès à l'eau et à moins considérer la qualité de l'eau qu'elles consomment ainsi que les conséquences qui peuvent en résulter (Agassounon *et al.*, 2010). C'est ainsi qu'en Côte d'Ivoire, on assiste aujourd'hui à l'utilisation des eaux souterraines comme la seule ressource en eau potable dans la plupart des zones urbaines et rurales du bassin du Cavally par le biais de plusieurs puits à pompe manuelle ou de puits traditionnels. Les impacts environnementaux liés aux activités extractives en Côte d'Ivoire progressent d'une façon inquiétante. Cela se traduit par des dégradations environnementales dont les plus visibles sont : la déforestation, la perte de la biodiversité, la pollution et aussi par des conséquences sur l'hygiène et la santé aux niveaux communautaire et domestique. La pollution

minérale constitue un problème d'actualité qui préoccupe la communauté scientifique qui accorde de l'intérêt à la qualité de la vie, c'est-à-dire à la qualité des eaux souterraines qui est mise à mal par les activités humaines et les catastrophes naturelles. Cette préoccupation touche la Sous-préfecture de Zouan-Hounien, où une importante activité minière est menée depuis 1990. Cette activité minière se concrétise par plusieurs sites d'exploitations artisanales d'or disséminés dans la Sous-préfecture de Zouan-Hounien et d'une mine d'or, la mine d'Ity à quinze (15) kilomètres de la ville. Le bassin du Cavally est une zone agricole. Les eaux souterraines sont, dans la plupart des cas, de meilleure qualité que les eaux de surface car elles sont moins directement exposées aux pollutions. Cependant, si les pollutions sont en général plus discrètes, elles peuvent persister beaucoup plus longtemps et il est très difficile de remédier à la contamination. Les eaux souterraines n'étant pas à l'abri de la pollution et d'activités telles que l'extraction minière, les pratiques agricoles, l'urbanisation rapide ainsi que les déchets ménagers et industriels peuvent constituer une menace sérieuse pour le potentiel en eaux souterraines du bassin (Gibrilla *et al.*, 2010). Etant donné que les eaux souterraines sont souvent utilisées pour l'alimentation en eau potable, leur protection vis-à-vis des pollutions est un enjeu majeur. Etudier la qualité hydrogéochimique et souterraine du bassin devient très importante. En fait, la qualité de l'eau souterraine reflète l'impact du changement qui se produit dans la région. Cette étude a évalué la contamination des eaux souterraines et a déterminé l'origine de leur pollution dans l'environnement minier de Zouan-Hounien (Côte d'Ivoire). Pour atteindre notre objectif, des prélèvements et analyses ont été effectués sur des eaux souterraines du bassin du fleuve Cavally sur une période de deux années successives.

Matériel et méthode

Zone d'étude

Ity est un village situé à 15 km au Sud-Est de Zouan-Hounien (Côte d'Ivoire) qui est son chef-lieu de département. Le secteur d'Ity est moyennement accidenté avec des altitudes variant entre 255 m au bord du fleuve Cavally et 450 m. La région appartient à une vaste zone forestière qui couvre à la fois la Côte d'Ivoire et le Liberia (Ettien, 2010). Situé à l'Ouest de la Côte d'Ivoire, le bassin versant du Cavally est entre 6°47' et 6°52' de latitude Nord, et entre 8°5' et 8°6' de longitude Ouest. Ce bassin versant a une superficie de 3647,53 km² avec la station hydrométrique de Floleu comme exutoire (figure 1). Avec une longueur de 700 km, le fleuve Cavally est partagé par trois pays : la Côte d'Ivoire, la Guinée et le Libéria. Le Cavally présente beaucoup de méandres et le lit du cours d'eau est perturbé par les activités d'orpaillage (Naho, 1988). Les produits de base sont essentiellement le café, de cacao, l'huile de palme, le manioc, le riz et la banane.

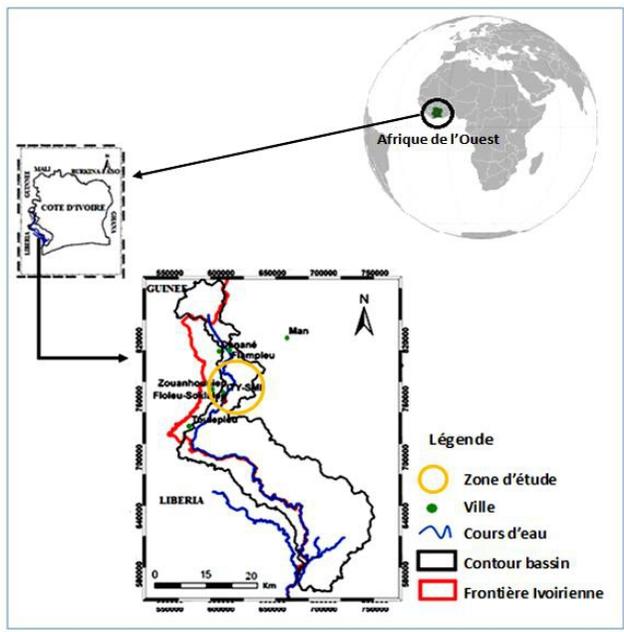


Figure 3 : Carte de la présentation de la zone d'étude du bassin versant du Cavally

Le graphique ci-dessous (figure 4) montrant les hauteurs de pluies annuelles indique qu'il y a alternance de deux saisons des pluies : grande saison sèche de Novembre à Février, petite saison des pluies de Mars à Juillet, petite saison sèche de fin Juillet à fin Août, grande saison des pluies de Septembre à Novembre. Le mois le plus sec est celui de Janvier avec 15 mm. Les précipitations les plus importantes sont enregistrées en Septembre et sont de 237 mm en moyenne. La moyenne annuelle des précipitations est de 1866 mm et la température moyenne annuelle à Zouan-Hounien est de 25,6 °C (Ettien, 2005). L'étude des variations de la pluviométrie et du degré hygrométrique montre que le régime pluvial évolue dans le sens d'une diminution des précipitations annuelles et d'une aggravation de la saison sèche. Cette dessiccation progressive serait due à la déforestation des zones les plus peuplées, l'accroissement démographique entraînant la disparition de la forêt primaire mais aussi de la forêt secondaire (Servat *et al.*, 1998 ; Ouedraogo, 2001).

Le fleuve Cavally et son affluent le Nuon arrosent toute la région des montagnes. Cependant, plusieurs villages doivent faire face à une sérieuse pénurie d'eau pendant la grande saison sèche (Ettien, 2005).

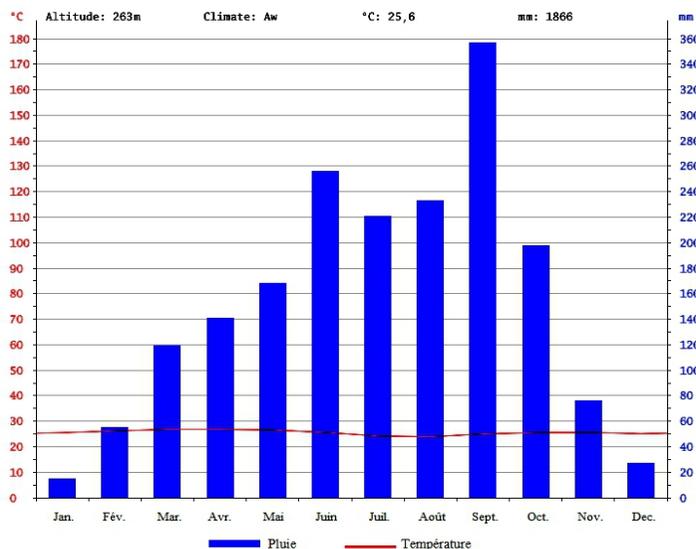


Figure 2 : Diagramme ombrothermique de la station de Zouan-Hounien de 1982 et 2012 (Source : <https://fr.climate-data.org/afrique/Cote-d-ivoire/montagnes/zouan-hounien-45180/>)

La géologie locale est difficile à définir, car il n'existe pas d'affleurement dans la zone. A cette difficulté, s'ajoute la présence d'une couverture végétale dense. Le gisement aurifère d'Ity est situé dans l'unité birimienne Toulépleu-Ity localisée à l'ouest de la faille du Sassandra, dans le domaine Kénema-Man. Cet ensemble s'oriente selon une direction NE-SW (Ettien, 2005). Les travaux de prospection entre 1962 et 1968 de la SODEMI ont révélé une forte minéralisation en or du secteur d'Ity où, dans les années 1940 et 1950 il existait déjà d'intenses activités d'orpaillage (Papon, 1973). Ces activités d'orpaillage sont très accrues aujourd'hui. Au Nord, le bassin est dominé par les schistes, les rhyolites et les migmatites alors qu'au Sud, il est caractérisé par des roches métamorphiques et des gneiss (Milesi *et al.*, 1989). L'érosion, violente, est un caractère de rajeunissement de ces sols (Vo Quang Tri & M de Guyon, 1966).

Collecte d'échantillons

Les lieux d'échantillonnage ont été choisis en vue d'une couverture spatiale de la zone la plus grande possible et facile d'accès par piste surtout en saison pluvieuse, des zones soumises à la pression des activités anthropiques, de l'influence du cours d'eau alimentant des puits, des zones hors influences du cours d'eau. Des points d'échantillonnage sur le terrain ont été sélectionnés, en tenant compte de la disponibilité des forages et/ou des puits dans la région. Les mesures ont été réalisées deux fois durant la saison sèche (saison d'étiage) et deux fois durant la saison pluvieuse (saison de crue) sur une période d'un cycle annuel pendant deux années consécutives sur le site

d'étude (Konan *et al.*, 2005). Au total, vingt huit (28) échantillons d'eau ont été collectés à divers endroits (figure 3) au cours de quatre campagnes qui ont débuté le 04 Janvier 2017 et pris fin le 20 Octobre 2018. Au cours de l'étude, les prélèvements ont été effectués entre 07h et 16h. Les points d'échantillonnage ont été localisés à l'aide d'un récepteur de type Garmin etrex 20 du système de positionnement global (GPS).

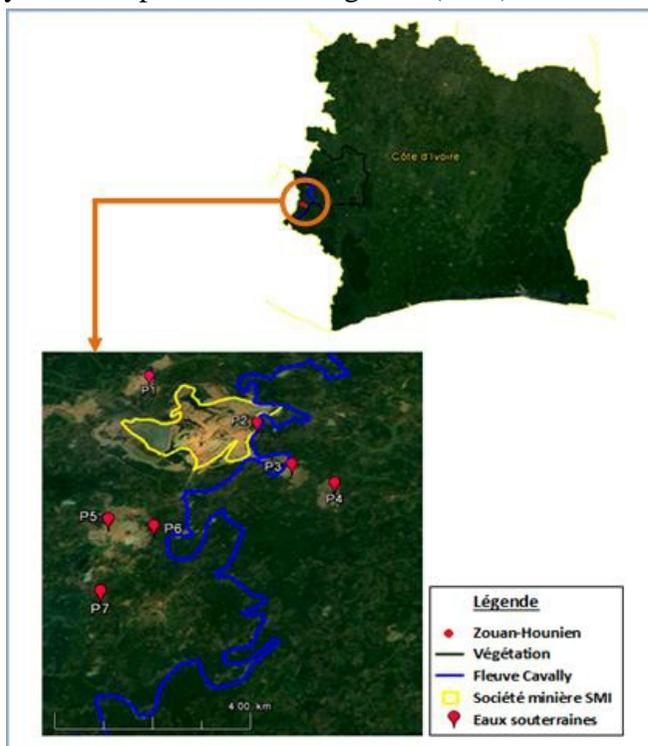


Figure 3 : Carte des différentes stations de prélèvements de la zone d'étude Ity-Floleu

La profondeur des puits utilisés pour les usages domestiques était comprise entre 0,3 et 17 mètres (figure 4). Les échantillons d'eau ont été prélevés à l'aide de bouteille de 1L neuve en plastique en polyéthylène (PET), remplies jusqu'à ras-bord (sans laisser de bulles d'air) et préalablement rincées à l'eau distillée puis avec l'eau de la station, acidifiés sur le terrain avec de l'acide nitrique (HNO_3) environ 1 N (Rodier, 2009), soigneusement identifié, hermétiquement fermé et conservés à 4 °C dans une glacière puis stockés au réfrigérateur à une température inférieure à 10°C dès le retour du terrain pour les analyses des paramètres chimiques au laboratoire selon les normes AFNOR (1997) ou celles homologuées par Rodier (2009). Le remplissage des flacons est effectué à plus que 20 cm de la surface pour éviter l'effet du film.



Photo 1 : Village Ity

Photo 2 : Campement Dohodompleu **Photo 3 :** Village Floleu

Figure 4 : Vue en image de quelques points d'échantillonnage de la zone Ity-Floleu

Analyse d'échantillon

Les paramètres physico-chimiques tels que la conductivité, la température, le total des sels dissous (TDS), la salinité, le pH, le potentiel redox, la turbidité et l'oxygène dissous ont été déterminés sur le terrain (*in situ*) à l'aide d'un multiparamètre de marque HANNA-HI9820, tandis que les nitrates (NO_3^-), les nitrites (NO_2^-), l'ion ammonium (NH_4^+), les phosphates (PO_4^{3-}) et les sulfates (SO_4^{2-}) ont été analysés par dosage colorimétrique en utilisant des méthodes standard. De même que les éléments majeurs (Ca, Fe, K, Mg, Mn et Na) et les éléments traces minéraux (As, Cd, Cu, Ni, Pb et Zn) ont été analysés par la méthode spectrophotométrique (précision $\pm 1\text{nm}$) à l'aide de la méthode ICP-AAS de marque Spectra 110. Ce spectromètre fonctionne en mode simultané, c'est à dire que tous les éléments sont analysés en même temps dans les mêmes conditions opératoires. Les analyses ont été faites au Centre de recherche en océanologie (CRO) d'Abidjan (Côte d'Ivoire). Ces paramètres ont été déterminés selon les méthodes d'analyses préconisées par les normes AFNOR (1997) et par Rodier et *al.* (1996).

Données et méthodes

Les résultats sont exprimés sous forme de moyennes par saison calculés avec le logiciel Excel 2007. La comparaison des moyennes, les corrélations, les Analyses en Composante Principale (ACP) et Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) ont été fait à l'aide du logiciel statistique XLSTAT version 2016.02.27444.

Indice de qualité des eaux (WQI) pour les eaux souterraines

L'indice de qualité de l'eau (WQI) a été calculé pour évaluer l'influence des activités naturelles et anthropiques basées sur plusieurs

paramètres clés de la chimie des eaux souterraines. Pour calculer le WQI, le poids a été attribué aux paramètres physico-chimiques en fonction de l'importance relative des paramètres dans la qualité globale de l'eau à des fins d'eau potable. Le poids attribué va de 1 à 5. Le poids maximal de 5 a été assigné aux nitrates, nitrites, TDS, en raison de leur importance majeure dans l'évaluation de la qualité de l'eau (Ramakrishnaiah *et al.*, 2009). De même, le poids 5 a été attribué aux métaux lourds comme l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le cuivre (Cu), le plomb (Pb), etc. En effet, du fait de leur caractère non-biodégradable, et de leur toxicité, les métaux lourds représentent un danger pour la santé humaine (Garbarino *et al.*, 1995 ; Shrestha *et al.*, 2016). Cependant, le magnésium a été affecté du poids 1 car il ne présente pas de réels effets nuisibles à la santé humaine ;

- le calcul du poids relatif (W_i) de chaque paramètre est effectué à partir de l'équation suivante (1) :

$$W_i = \frac{wi}{\sum_{i=1}^n wi} \tag{1}$$

Avec w_i est le poids de chaque paramètre
 n est le nombre de paramètres.

- la détermination d'une échelle d'estimation de la qualité (q_i) pour chaque paramètre en divisant sa concentration dans chaque échantillon d'eau par une valeur guide puis multiplié le résultat par 100. L'équation (2) illustre le calcul de q_i

$$q_i = (C_i/S_i) \times 100 \tag{2}$$

Où q_i désigne la qualité de l'eau estimée par rapport au paramètre i ;
 C_i est la concentration en $mg.L^{-1}$ de chaque paramètre mesurée dans chaque échantillon d'eau ;
 S_i est la valeur guide proposée pour les eaux de boisson.

- la détermination de l'indice de qualité de l'eau (WQI) est effectuée à partir des équations (3)

et (4) :

$$Sli = W_i \times q_i \tag{3}$$

$$WQI = \sum_{i=1}^n Sli \tag{4}$$

Où Sli , l'indice partiel (ou sous-indice), désigne l'indice de qualité pour un paramètre i donné.

Il est calculé pour chaque paramètre et l'addition de tous les Sli permet d'obtenir l'indice de qualité de l'eau du site concerné (WQI).

Résultats

Paramètres physico-chimiques des eaux souterraines

Les valeurs saisonnières des paramètres physico-chimiques (température, conductivité, TDS, salinité, pH, potentiel rédox, turbidité et oxygène dissous) mesurées dans les eaux souterraines de l'environnement minier d'Ity sont indiquées dans les tableaux suivants.

Les résultats du tableau 1 montrent que la température des eaux souterraines varie de 25,42°C à la station P₇ à 27,82 °C à la station P₄ en saison sèche, en saison pluvieuse de 26,03 °C à la station P₇ à 27,66 °C à la station P₃. Les valeurs de la conductivité se situent entre 11,60 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à la station P₇ et 280,50 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à la station P₆ en saison sèche, en saison pluvieuse entre 5,00 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à la station P₄ et 233,50 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ à la station P₆. Les valeurs extrêmes du TDS vont de 4,12 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ à la station P₅ à 65,92 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ à la station P₆ en saison sèche, en saison pluvieuse de 3,00 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ à la station P₄ à 116,50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ à la station P₆. Les valeurs de la salinité sont comprises entre 14,25 % à la station P₇ à 45,29 % à la station P₄ en saison sèche, en saison pluvieuse entre 0 % aux stations P₁, P₂, P₄, P₇ et 0,11 % à la station P₆. Les valeurs du pH varient entre 4,53 à la station P₃ et 5,37 à la station P₇ en saison sèche, en saison pluvieuse entre 3,75 à la station P₄ et 4,47 à la station P₇. Les valeurs du potentiel redox des eaux oscillent entre 28,15 mV à la station P₅ et 64,05 mV à la station P₃ en saison sèche, en saison pluvieuse entre 30,25 mV à la station P₁ et 65,80 mV à la station P₇. Les valeurs de la turbidité des échantillons d'eau sont nulles dans toutes les stations sauf aux stations P₂ (12 NTU) et P₇ (17 NTU) en saison sèche, en saison pluvieuse elles vont de 6 NTU à la station P₄ à 71 NTU à la station P₅. Les valeurs de l'oxygène dissous se situent entre 0,13 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ à la station P₅ et 2,24 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ à la station P₆ pendant la saison sèche, en saison pluvieuse entre 0,96 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ à la station P₅ et 3,04 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ à la station P₇.

Tableau 1 : Variation saisonnière des valeurs des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines

Stations	Saisons	Temp (°C)	Cond ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)	TDS (mg.L^{-1})	Sal (%)	pH	Potred (mV)	Turb (NTU)	Oxydis (mg.L^{-1})
P ₁	SS	27,35	25,35	7,76	35,90	4,60	46,00	0	1,98
	SP	26,69	11,00	5,50	0	4,15	30,25	24,00	2,07
P ₂	SS	26,55	17,33	5,58	20,10	5,30	26,40	12,00	1,5
	SP	27,15	8,50	4,00	0	4,29	36,00	13,00	2,1
P ₃	SS	27,69	66,40	14,15	35,21	4,53	60,65	0	1,02
	SP	27,66	38,00	19,00	0,02	3,88	38,40	17,00	1,29
P ₄	SS	27,82	85,25	39,42	45,29	5,07	50,30	0	1,13
	SP	26,31	5,00	3,00	0	3,75	32,00	6,00	1,86
P ₅	SS	27,52	60,55	4,12	33,95	5,14	28,15	0	0,13
	SP	27,09	34,50	17,00	0,01	4,24	35,10	71,00	0,96
P ₆	SS	27,47	280,50	65,92	24,81	4,73	64,05	0	2,24
	SP	26,90	233,50	116,50	0,11	4,19	38,40	27,00	2,27
P ₇	SS	25,42	11,60	3,70	14,25	5,37	58,55	17,00	1,99
	SP	26,03	8,50	4,50	0	4,47	65,80	45,00	3,04
Normes OMS		-	1000	500	-	6,5 à 8,5	-	5	-

SS ; Saison sèche et SP : Saison pluvieuse

Temp : température, Cond : conductivité, Sal : salinité, Potred : potentiel redox, Turb : turbidité, Oxydis : oxygène dissous

De l'examen du tableau 2, il ressort que les concentrations de nitrites (NO_2^-) sont comprises entre $0,020 \text{ mg.L}^{-1}$ à la station P₄ et $0,081 \text{ mg.L}^{-1}$ à la station P₆ en saison sèche, en saison pluvieuse entre $0,007 \text{ mg.L}^{-1}$ à la station P₄ et $0,026 \text{ mg.L}^{-1}$ à la station P₆. Les concentrations de nitrates (NO_3^-) varient entre $3,880 \text{ mg.L}^{-1}$ à la station P₇ et $72,745 \text{ mg.L}^{-1}$ à la station P₅ en saison sèche, en saison pluvieuse entre $5,000 \text{ mg.L}^{-1}$ à la station P₇ et $131,730 \text{ mg.L}^{-1}$ à la station P₆. Les teneurs en ammonium (NH_4^+) se situent entre $0,085 \text{ mg.L}^{-1}$ à la station P₅ et $0,204 \text{ mg.L}^{-1}$ à la station P₆ en saison sèche, en saison pluvieuse entre $0,071 \text{ mg.L}^{-1}$ à la station P₇ et $0,221 \text{ mg.L}^{-1}$ à la station P₄. Les concentrations de phosphates (PO_4^{3-}) oscillent entre $1,420 \text{ mg.L}^{-1}$ à la station P₅ et $7,685 \text{ mg.L}^{-1}$ à la station P₆ en saison sèche, en saison pluvieuse entre $0,070 \text{ mg.L}^{-1}$ à la station P₇ et $0,470 \text{ mg.L}^{-1}$ à la station P₄. Les teneurs en sulfates (SO_4^{2-}) vont de $3,410 \text{ mg.L}^{-1}$ à la station P₅ à $41,000 \text{ mg.L}^{-1}$ à la station P₇ en saison sèche, en saison pluvieuse de 0 mg.L^{-1} à la station P₄ et $3,050 \text{ mg.L}^{-1}$ à la station P₂.

Tableau 2 : Variation saisonnière des valeurs des sels nutritifs (en mg.L⁻¹) des eaux souterraines

Stations	Saisons	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻
P ₁	SS	0,028	17,290	0,105	2,050	5,965
	SP	0,016	32,060	0,146	0,320	0,150
P ₂	SS	0,023	9,330	0,192	1,920	5,785
	SP	0,016	11,550	0,143	0,155	3,050
P ₃	SS	0,032	60,365	0,100	2,275	5,270
	SP	0,013	63,540	0,122	0,335	0,530
P ₄	SS	0,020	12,890	0,123	2,165	4,725
	SP	0,007	5,800	0,221	0,470	0
P ₅	SS	0,027	72,745	0,085	1,420	3,410
	SP	0,019	57,605	0,083	0,105	0,395
P ₆	SS	0,081	60,600	0,204	7,685	31,595
	SP	0,026	131,730	0,171	0,225	0,900
P ₇	SS	0,063	3,880	0,177	7,630	41,000
	SP	0,008	5,000	0,071	0,070	1,205
Normes OMS		50	3	1,5	0,5	250

Le tableau 3 indique que les teneurs en Ca des eaux souterraines varient de 0,347 mg.L⁻¹ à la station P₇ et 1,892 mg.L⁻¹ à la station P₅ en saison sèche, en saison pluvieuse de 0,039 mg.L⁻¹ à la station P₃ et 4,721 mg.L⁻¹ à la station P₂. Les teneurs en Fe se situent entre 0,429 mg.L⁻¹ à la station P₁ et 0,758 mg.L⁻¹ à la station P₇ en saison sèche, en saison pluvieuse entre 0,086 mg.L⁻¹ à la station P₆ et 5,842 mg.L⁻¹ à la station P₁. Les teneurs en K sont comprises entre 0,427 mg.L⁻¹ à la station P₁ et 3,841 mg.L⁻¹ à la station P₅ en saison sèche, en saison pluvieuse entre 0,080 mg.L⁻¹ à la station P₃ et 4,942 mg.L⁻¹ à la station P₇. Les teneurs en Mg oscillent entre 0,038 mg.L⁻¹ à la station P₇ et 0,401 mg.L⁻¹ à la station P₅ en saison sèche, en saison pluvieuse entre 0,023 mg.L⁻¹ à la station P₃ et 0,170 mg.L⁻¹ à la station P₄. Les teneurs en Mn vont de 0,001 mg.L⁻¹ à la station P₇ à 0,012 mg.L⁻¹ à la station P₄ en saison sèche, en saison pluvieuse sont à la limite de détection dans toutes les stations. Les teneurs en Na vont de 1,937 mg.L⁻¹ à la station P₇ à 20,649 mg.L⁻¹ à la station P₅ en saison sèche, en saison pluvieuse de 0,885 mg.L⁻¹ à la station P₃ à 31,837 mg.L⁻¹ à la station P₇.

Tableau 3 : Variation saisonnière des éléments majeurs (mg.L⁻¹) des eaux souterraines

Stations	Saisons	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na
P₁	SS	0,530	0,429	0,427	0,100	0,004	2,969
	SP	0,166	5,842	0,191	0,033	< 0,005	2,415
P₂	SS	0,704	0,675	0,966	0,170	0,003	4,513
	SP	4,721	2,533	3,923	0,122	< 0,005	5,284
P₃	SS	0,407	0,593	0,480	0,124	0,007	2,897
	SP	0,039	< 0,050	0,080	0,023	< 0,005	0,885
P₄	SS	0,559	< 0,050	0,833	0,173	0,012	6,059
	SP	0,160	< 0,050	1,070	0,170	< 0,005	3,110
P₅	SS	1,892	< 0,050	3,841	0,401	0,008	20,649
	SP	0,816	5,842	1,345	0,065	< 0,005	4,973
P₆	SS	0,911	0,642	2,952	0,183	0,004	17,428
	SP	0,494	0,086	2,253	0,100	< 0,005	4,799
P₇	SS	0,347	0,758	1,237	0,038	0,001	1,937
	SP	0,201	3,151	4,942	0,036	< 0,005	31,837
Normes OMS		100	0,3	12	50	0,4	150

De l'observation du tableau 4, il ressort que les teneurs en As sont à la limite de détection dans toutes les stations excepté les stations P₁ (0,179 mg.L⁻¹) en saison sèche et P₆ (0,011 mg.L⁻¹) en saison pluvieuse. Les teneurs en Cd varient de la limite de détection dans presque toutes les stations à 0,135 mg.L⁻¹ à la station P₅ en saison sèche, en saison pluvieuse à 0,002 mg.L⁻¹ à la station P₂. Les concentrations en Cu sont à la limite de détection dans toutes les stations en saison sèche, en saison pluvieuse elles varient de 0,006 mg.L⁻¹ à la station P₂ à 2,71 mg.L⁻¹ à la station P₇. Les teneurs en Ni sont comprises entre la limite de détection aux stations P₁, P₄ et P₇ et 0,261 mg.L⁻¹ à la station P₃ en saison sèche, en saison pluvieuse elles sont à la limite de détection dans toutes les stations. Les concentrations en Pb varient de la limite de détection aux stations P₄ et P₅ à 4,838 mg.L⁻¹ à la station P₂ en saison sèche, en saison pluvieuse de la limite de détection dans toutes les stations hormis la station P₃ (0,626 mg.L⁻¹) à la station P₃. Les teneurs en Zn se situent entre la limite de détection aux stations P₄, P₅, P₆, P₇ et 0,250 mg.L⁻¹ à la station P₁ en saison sèche, en saison pluvieuse entre la limite de détection aux stations P₁, P₃, P₄, P₅, P₆ et 0,482 mg.L⁻¹ à la station P₂.

Tableau 4 : Variation saisonnière des éléments traces minéraux (mg.L⁻¹) des eaux souterraines

Stations	Saisons	As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
P₁	SS	0,180	< 0,0005	< 0,050	< 0,005	1,622	0,250
	SP	< 0,005	< 0,0005	1,745	< 0,005	< 0,005	< 0,010
P₂	SS	< 0,005	< 0,0005	< 0,050	0,019	4,838	0,225
	SP	< 0,005	0,002	0,006	< 0,005	< 0,005	0,482
P₃	SS	< 0,005	< 0,0005	< 0,050	0,261	1,973	0,207
	SP	< 0,005	< 0,0005	1,160	< 0,005	0,626	< 0,010
P₄	SS	< 0,005	< 0,0005	< 0,050	< 0,005	< 0,005	< 0,010
	SP	< 0,005	< 0,0005	0,986	< 0,005	< 0,005	< 0,010
P₅	SS	< 0,005	0,135	< 0,050	0,062	< 0,005	< 0,010
	SP	< 0,005	< 0,0005	1,777	< 0,005	< 0,005	< 0,010
P₆	SS	< 0,005	< 0,0005	< 0,050	0,061	< 0,005	< 0,010
	SP	0,012	< 0,0005	1,900	< 0,005	2,570	< 0,010
P₇	SS	< 0,005	< 0,0005	< 0,050	< 0,005	< 0,005	< 0,010
	SP	< 0,005	< 0,0005	2,713	< 0,005	3,678	0,159
Normes OMS		0,01	0,003	2	0,07	0,01	3

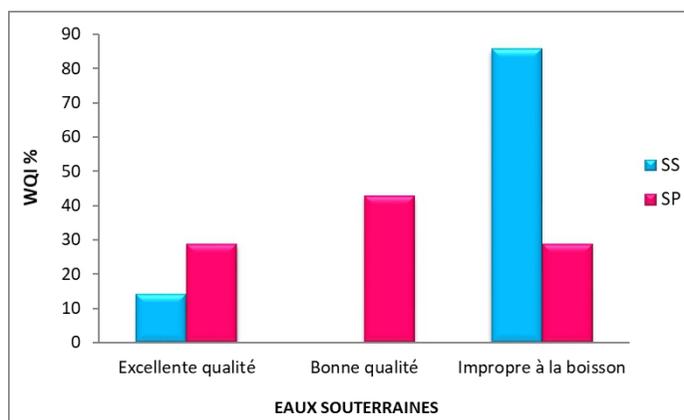
Calcul de l'indice de qualité des eaux (WQI) pour les eaux souterraines

La qualité des eaux a été étudiée à partir de l'évaluation de l'indice de qualité. Cet indice a été calculé pour les eaux souterraines. L'ensemble des eaux étudiées et sont pour la plupart des eaux de puits. La qualité des eaux souterraines de la zone d'étude a été évaluée sur la base plusieurs paramètres (conductivité, température, TDS, pH, turbidité, Oxygène dissous, nitrites, nitrates, ammonium, sulfates, calcium, fer, potassium, magnésium, sodium, arsenic, cadmium, cuivre plomb). Les valeurs de WQI obtenues dans cette étude varient de 9,07 à 3983,24 (tableau 5). L'analyse des résultats montrent que la qualité des eaux étudiées varie de excellente à impropre à la boisson. Ramakrishnaiah et al. (2009) ont défini cinq classifications des eaux basée sur les valeurs WQI : $0 \leq WQI < 50$ (Excellente qualité), $50 \leq WQI < 100$ (Bonne qualité), $100 \leq WQI < 200$ (Qualité médiocre), $200 \leq WQI < 300$ (Qualité mauvaise), $WQI \geq 300$ (Eau impropre à la boisson).

Tableau 5 : Résultats du calcul des indices de qualité des eaux souterraines par saison

Saisons	Saison sèche		Saison pluvieuse	
	WQI	Qualité des eaux	WQI	Qualité des eaux
P ₁	1486,22	Eau impropre à la boisson	57,96	Bonne qualité
P ₂	3983,24	Eau impropre à la boisson	26,75	Excellente qualité
P ₃	1633,94	Eau impropre à la boisson	539,36	Eau impropre à la boisson
P ₄	9,07	Excellente qualité	12,90	Excellente qualité
P ₅	374,16	Eau impropre à la boisson	416,25	Eau impropre à la boisson
P ₆	2129,99	Eau impropre à la boisson	56,54	Bonne qualité
P ₇	3030,28	Eau impropre à la boisson	51,27	Bonne qualité

La figure 5 illustre la répartition des classes d'eau par saison. Pendant la saison sèche, les eaux d'excellente qualité ($0 < WQI < 50$) représentent 14,3% des eaux étudiées et les eaux de qualité impropre à la boisson ($WQI > 300$) représentent 85,7%. Ces valeurs de WQI élevées sont surtout dues au pH, à la turbidité de ces eaux et de leurs fortes concentrations en Fe, As, Cd et Pb. Pendant la saison pluvieuse, les eaux d'excellente qualité correspondent à 28,6% de l'ensemble des eaux étudiées, les eaux de bonne qualité expriment 42,8% et les eaux de qualité impropre à la boisson expriment 28,6%. Ces valeurs de WQI élevées sont surtout dues au pH, à la turbidité de ces eaux et de leurs fortes concentrations en nitrate, Fe, As, Cd, Cu et Pb.

**Figure 5** : Pourcentage des différentes classes de qualité des eaux souterraines

Ainsi, pendant la saison sèche la grande majorité (85,7%) des eaux étudiées ont un indice très supérieur à 100 qui est la limite supérieure des eaux de bonne qualité. Par contre, pendant la saison pluvieuse une minorité (28,6%) des eaux souterraines a un indice supérieur à 100.

Matrice de corrélations entre les variables des eaux souterraines

Le tableau 6 indique que la température est corrélée positivement avec le TDS ($r = 0,993$), les nitrites ($r = 0,800$), les nitrates ($r = 0,785$), le manganèse ($r = 0,705$) mais négativement avec le pH ($r = -0,746$), l'oxygène dissous ($r = -0,786$) et les sulfates ($r = -0,734$). Le TDS est corrélé positivement avec les nitrites ($r = 0,777$), les nitrates ($r = 0,713$) et l'ammonium ($r = 0,626$). La salinité est bien corrélée positivement avec le manganèse ($r = 0,920$) et négativement avec l'oxygène dissous ($r = -0,849$) et le plomb ($r = -0,809$). Les phosphates sont corrélés positivement avec le potentiel redox ($r = 0,832$) et les nitrates ($r = 0,866$). Les sulfates sont corrélés avec le potentiel redox ($r = 0,806$), l'oxygène dissous ($r = 0,795$), les nitrites ($r = 0,803$) et les phosphates ($r = 0,965$) mais négativement avec la température ($r = -0,734$). Le sodium est corrélé positivement avec la turbidité ($r = 0,817$), les sulfates ($r = 0,736$) et le potassium ($r = 0,864$) et de plus le potassium est corrélé positivement avec le pH ($r = 0,779$). Le cadmium est bien corrélé positivement avec le fer ($r = 0,924$) et à un degré moindre avec le magnésium ($r = 0,700$). Le plomb est corrélé positivement avec l'oxygène dissous ($r = 0,820$) et négativement avec le manganèse ($r = -0,857$).

Variables	Cond	Temp	TDS	Sal	pH	Potred	Turb	Oxydis	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Ca	Fe	K	Mg	Mn	Na	As	Cd	Cu	Ni	Pb	Zn
Cond	1																								
Temp	0,298	1																							
TDS	0,993	0,279	1																						
Sal	-0,027	0,625	0,029	1																					
pH	-0,315	-0,746	-0,300	-0,364	1																				
Potred	0,251	-0,473	0,283	-0,242	0,021	1																			
Turb	-0,175	-0,500	-0,257	-0,537	0,545	0,046	1																		
Oxydis	0,085	-0,786	0,082	-0,849	0,326	0,501	0,279	1																	
NO ₂ ⁻	0,800	-0,264	0,777	-0,529	-0,009	0,559	0,218	0,611	1																
NO ₃ ⁻	0,785	0,553	0,713	-0,060	-0,547	0,013	0,080	-0,145	0,582	1															
NH ₄ ⁺	0,555	-0,096	0,626	-0,086	0,093	0,172	-0,546	0,342	0,446	-0,007	1														
PO ₄ ³⁻	0,560	-0,559	0,582	-0,448	0,227	0,832	0,164	0,687	0,866	0,174	0,487	1													
SO ₄ ²⁻	0,372	-0,734	0,383	-0,609	0,393	0,806	0,347	0,795	0,803	0,042	0,366	0,965	1												
Ca	-0,145	0,003	-0,171	-0,320	0,440	-0,690	0,111	0,009	-0,202	-0,123	0,216	-0,375	-0,278	1											
Fe	-0,290	-0,003	-0,382	-0,139	0,236	-0,506	0,784	-0,198	-0,191	0,152	-0,732	-0,410	-0,272	0,257	1										
K	0,209	-0,597	0,174	-0,655	0,779	0,140	0,691	0,486	0,519	0,061	0,189	0,509	0,626	0,433	0,292	1									
Mg	0,228	0,482	0,200	0,381	0,175	-0,648	0,137	-0,655	-0,172	0,310	-0,040	-0,393	-0,446	0,492	0,459	0,247	1								
Mn	0,060	0,705	0,087	0,920	-0,298	-0,257	-0,345	-0,950	-0,462	0,141	-0,198	-0,448	-0,596	-0,206	0,013	-0,457	0,588	1							
Na	0,179	-0,654	0,145	-0,501	0,673	0,417	0,817	0,438	0,555	0,086	-0,081	0,631	0,736	-0,038	0,363	0,864	0,090	-0,332	1						
As	-0,238	0,006	-0,231	0,112	-0,368	-0,230	-0,168	0,138	-0,181	-0,179	-0,149	-0,251	-0,248	-0,251	0,119	-0,528	-0,368	-0,212	-0,403	1					
Cd	-0,094	0,206	-0,181	0,049	0,197	-0,493	0,695	-0,437	-0,161	0,321	-0,657	-0,395	-0,318	0,255	0,924	0,316	0,700	0,296	0,376	-0,170	1				
Cu	0,178	-0,485	0,151	-0,271	0,098	0,644	0,589	0,420	0,551	0,189	-0,296	0,628	0,665	-0,667	0,239	0,283	-0,348	-0,274	0,693	0,142	0,147	1			
Ni	0,128	0,567	0,078	0,031	-0,675	0,136	-0,177	-0,285	-0,014	0,530	-0,323	-0,183	-0,242	-0,218	-0,108	-0,391	-0,131	0,217	-0,351	-0,271	0,018	-0,132	1		
Pb	-0,059	-0,616	-0,052	-0,809	0,417	0,170	0,058	0,820	0,317	-0,292	0,499	0,376	0,496	0,477	-0,299	0,478	-0,440	-0,857	0,167	-0,092	-0,475	-0,146	-0,213	1	
Zn	-0,413	-0,245	-0,416	-0,513	0,219	0,007	-0,069	0,319	-0,207	-0,354	0,099	-0,113	0,018	0,498	-0,247	0,136	-0,335	-0,443	-0,171	-0,332	-0,320	-0,486	0,290	0,715	1

Tableau 6 : Matrice de corrélation entre les variables des eaux souterraines

K et Na (1^{er} regroupement) qui s'opposent à Temp, Sal et Mn (2^e regroupement). La seconde composante (F2) représente 20,61 % de la totalité de la variance. Elle associe fortement NO₃⁻, NH₄⁺, TDS et Cond (3^e regroupement) qui s'oppose au pH, Turb, Cd, Ca et Fe (4^e regroupement). Enfin la troisième composante (F3) représente environ 18,09 % de la variance totale. Elle est associée au Mg et Zn.

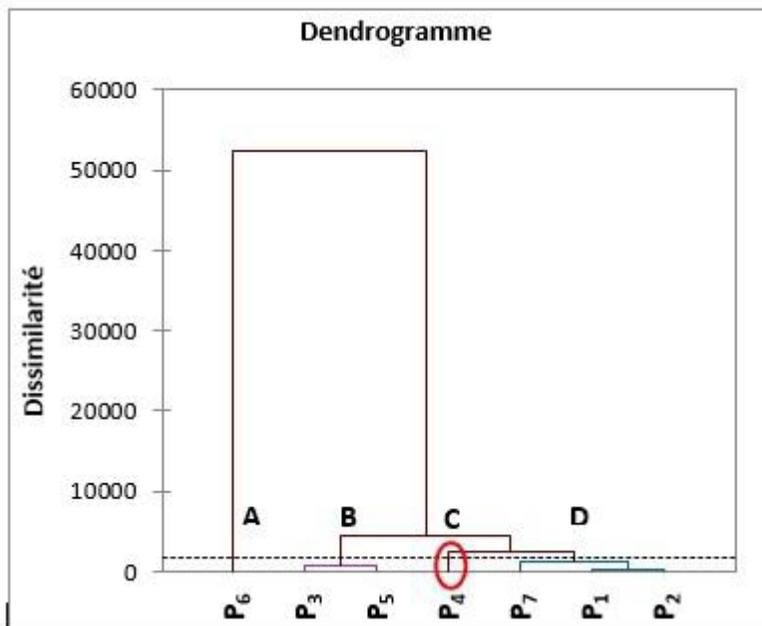


Figure 7 : Dendrogramme de la classification des eaux souterraines de la région

Analyse en Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) : La figure 7 présente le dendrogramme issu de la classification des eaux souterraines de la région sur la base de tous les paramètres physico-chimiques. Ce dendrogramme met en évidence quatre groupements (dissimilarité élevée) et des sous-groupements (dissimilarité faible). Le premier groupe (A) concerne uniquement l'eau du puits du village Floleu (P₆) qui présente la pollution la plus importante des eaux étudiées. Cette pollution est d'origine naturelle et anthropique (domestique). La forte valeur de la conductivité au puits P₆ (une moyenne de 257 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) pourrait s'expliquer par l'infiltration des eaux usées dans la nappe phréatique. Les fosses septiques avoisinantes pourraient en être la source. Le deuxième groupe (B) concerne les eaux dont la pollution est moins importante. Il prend en compte l'eau du puits du village Daapleu (P₃) et l'eau de puits du village Floleu (P₅) d'origine naturelle. Le troisième groupement (C) constitué de l'eau de puits du village Kouizompleu (P₄) indique que la pollution est d'origine naturelle. Le quatrième groupement (D) se compose des eaux de pollution intermédiaire moins importante dans

l'ensemble. Ce sont : l'eau du puits du campement Maurice (P₇) et les eaux des puits du village Ity (P₁) et du village Dohoudompleu (P₂). Leur pollution d'origine naturelle.

Discussion

Caractérisation physico-chimique et qualité de l'eau

Dans la localité de Ity-Floleu, la température des eaux souterraines est généralement basse et varie de 25,42 °C à 27,82 °C avec une moyenne de 26,97 °C. Cette température correspond aux variations saisonnières des températures atmosphériques ambiantes définies par les données météorologiques (25,6 °C). En effet, la température de l'eau est un facteur important dans l'environnement aquatique du fait qu'elle régit la presque totalité des réactions physiques, chimiques et biologiques (Chapman & Kimstach, 1996).

Le pH varie de 3,75 à 5,37 et sa moyenne est de 4,55. Cela indique que les eaux souterraines sont acides donc corrosifs. En effet, l'acidité des eaux a été observée dans plusieurs régions du pays. Il s'agit notamment des régions de Katiola (Oga *et al.*, 2010), de Bingerville (Kanohin *et al.*, 2017) et région de San-Pédro (Lasm *et al.*, 2011).

Les valeurs du TDS varient de 3,00 à 116,5 mg.L⁻¹ avec une moyenne de 22,15 mg.L⁻¹. Les valeurs du potentiel redox se situent entre 26,40 et 65,80 mV et sa moyenne est de 43,58 mV. Les analyses des valeurs du TDS montrent que ces eaux sont faiblement minéralisées et celles du potentiel redox indiquent que toutes les eaux souterraines sont dans des conditions oxydantes pendant les deux saisons. Des mesures effectuées dans les eaux souterraines au Congo ont montré des variations des TDS entre 40,4 mg.L⁻¹ et 229,8 mg.L⁻¹ (Matini *et al.*, 2009) plus élevées à celles que nous avons obtenues. Dans le même sens, au Mali, les taux des TDS mesurés dans les eaux douces indiquent qu'en saison sèche, ils se situent entre 12 et 720 mg.L⁻¹, alors qu'en saison chaude l'écart se creuse, se situant entre 10,5 et 3950 mg.L⁻¹ (Coulibaly, 2005).

Les valeurs des conductivités vont de 5,00 à 280,50 µS.cm⁻¹ avec une moyenne de 63,28 µS.cm⁻¹. D'une façon générale la conductivité de ces eaux est faible par rapport à celles des eaux minérales qui se situent entre 200 et 1000 µS.cm⁻¹ (Hade, 2002). La conductivité d'une eau naturelle est comprise entre 50 et 1500 µS.cm⁻¹ (De villers *et al.*, 2009).

Les valeurs de la salinité vont de 0 à 45,29 % avec une moyenne de 14,98 %. Ces résultats plus faibles pendant la saison des pluies montrent que la recharge des nappes est essentiellement tributaire des eaux de pluies conformément aux travaux de Loukman *et al.* (2017). Ce sont principalement les précipitations qui alimentent les nappes d'eau souterraine à partir de zones de recharge. Les valeurs de la turbidité sont comprises entre 0 et 71 NTU et une moyenne de 16,57 NTU. Les valeurs peu élevées de la turbidité dans

toutes les stations lors de la saison pluvieuse pourraient montrer le renouvellement des réserves de la nappe souterraine par l'eau de pluie par infiltration et percolation en fonction de la perméabilité du sol et de la nature. La turbidité affecte beaucoup la potabilité d'une eau de boisson.

L'oxygène dissous varie de 0,13 à 3,04 mg.L⁻¹ avec une moyenne de 1,68 mg.L⁻¹. On remarque que la valeur de l'oxygène dissous diminue en fonction de la profondeur du puits.

Concernant les sels nutritifs, les teneurs en nitrates dans toutes les stations ne respectent pas les normes OMS (2004) en toute saison et celles des phosphates pendant la saison sèche. Au-delà de 100 mg par litre, l'eau ne doit ni être bue ni être utilisée pour préparer les aliments (OMS, 2011). La dégradation de la qualité de l'eau souterraine de la zone d'étude est liée essentiellement aux altérations par les nitrates et les phosphates. Toutes les formes d'azote (azote organique, ammoniacque, nitrites, etc) sont susceptibles d'être à l'origine des nitrates par un processus d'oxydation biologique. Les nitrates sont des sels très solubles qui sont facilement entraînés en profondeur par les eaux d'infiltration. Les apports phosphatés dans les eaux souterraines font majoritairement, voire uniquement, référence à des impacts liés à des problèmes d'assainissement, plus qu'à des pratiques agricoles : effluents de dispositifs septiques (Robertson *et al.*, 1998), absence d'assainissement.

Les eaux souterraines contiennent des éléments dissous dont les prépondérants sont le fer (Fe), le sodium (Na), le potassium (K) et le calcium (Ca). Toutes ces eaux souterraines respectent les normes OMS en ce qui concerne les éléments majeurs étudiés sauf les teneurs en fer. D'autres éléments ne sont présents qu'à l'état de traces comme l'arsenic, le plomb, le cuivre, le zinc etc. Ces résultats montrent que seules les concentrations de Pb dans les eaux souterraines sont relativement élevées dans la plupart des stations étudiées. En dehors du Zn, les autres métaux ont des teneurs qui dépassent parfois les normes de potabilités fixées par l'OMS pour quelques stations surtout en saison sèche, occasionnant ainsi la détérioration de la qualité de ces eaux souterraines. Par conséquent, leur consommation ou utilisation pour l'irrigation agricole de ces eaux souterraines pourrait constituer les risques de bioaccumulation et de toxicité et engendrer des impacts négatifs sur la santé de la population.

Evaluation de la qualité des eaux souterraines de l'environnement minier d'Ity

La qualité des eaux souterraines a été étudiée à partir de l'évaluation de l'indice de qualité. En somme pour les eaux souterraines étudiées, seuls le Cd et la turbidité présentent des valeurs dépassant les directives OMS. Ainsi, ces fortes valeurs influencent la qualité globale des eaux étudiées comme l'attestent les résultats du WQI. Ces résultats ont montré que la majorité des

eaux souterraines de la zone d'étude sont de mauvaise qualité due au pH, à la turbidité, aux concentrations en Fe et Pb surtout en saison sèche. Pendant que la contamination par le Pb semble d'origine minière comme le montre les résultats des analyses des eaux souterraines, celle du Fe pourrait provenir des activités agricoles du fait de la généralisation de la contamination dans le secteur étudié. Par ailleurs, les effluents miniers étant chargés d'éléments traces métalliques, ils peuvent provoquer la pollution des eaux souterraines via les eaux de surface. Cette étude a ainsi permis d'avoir une vision globale sur l'état de la qualité des eaux souterraines après l'extension de la société minière SMI-Ity, l'ouverture d'un site annexe de la SMI à Daapleu et l'intense activité d'orpaillage en mettant l'accent sur l'état de la qualité des eaux souterraines consommées par les populations riveraines. Afin de caractériser avec précision l'origine de la pollution des eaux par les métaux, il est nécessaire de réaliser une étude plus détaillée.

Origine de la pollution des eaux souterraines de l'environnement minier d'Ity

L'analyse en composante principale (ACP) est un outil statistique généralement utilisé dans les études géochimiques pour simplifier le nombre de variables et faciliter l'interprétation des données (Facchinelli *et al.*, 2001 ; Liu *et al.*, 2003). L'analyse des résultats de l'ACP dans l'espace des variables du plan factoriel (F1-F2) permet d'indiquer que ce plan exprime 54,08 % de la variance exprimée. Le facteur F1 (33,47 %) lié par Potred, NO_2^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , Cu, Pb, K et Na (1^{er} regroupement) qui s'opposent à Temp, Sal et Mn (2^e regroupement) d'origine naturelle est caractérisé par des contaminants descripteurs de pollution d'origine anthropique (activité minière et agricole) et le pluvio-lessivage. Ce regroupement indique que les variables concernées évoluent de la même façon et sont tributaires d'un même phénomène ou de phénomènes semblables. Les variables NO_2^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} sont fortement influencés par le potentiel redox. Les sulfates sont naturellement présents dans divers minéraux. Leurs concentrations élevées dans les eaux souterraines sont généralement d'origine naturelle. Les sulfates peuvent également avoir une origine anthropique, et être présents dans l'eau via les effluents (miniers et agricoles) et les dépôts d'origine atmosphérique. Les éléments majeurs K et Na ont la particularité d'apparaître dans l'eau après un contact prolongé de celle-ci avec les roches encaissantes. En somme, la présence de ces éléments majeurs est d'origine naturelle. Cependant si on les place dans le plan (F1-F3) on s'aperçoit que le pH vient s'ajouter au 1^{er} regroupement. La minéralisation de K et Na liée à l'altération des matériaux aquifères par les précipitations et au retour des eaux d'irrigation se fait en présence de plusieurs polluants (NO_2^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , Cu et Pb) d'origine anthropique (activités agricoles ou minière). La seconde composante (F2) représente 20,61 % de la totalité de la variance.

Elle associe fortement NO_3^- , NH_4^+ , TDS et Cond (3^e regroupement) qui s'oppose au pH, Turb, Cd, Ca et Fe (4^e regroupement). Ces éléments pouvant avoir une origine naturelle ou anthropique, cette composante semble être le reflet du mélange d'apports anthropiques et d'apports naturels. Les nitrates peuvent provenir de la décomposition des déchets organiques (transformation de l'ammonium en nitrites ou en nitrates). L'ammonium est lié soit à la réduction des nitrates (la réduction est une réaction chimique inverse de l'oxydation), soit aux activités humaines (rejets d'effluents miniers, épandages agricoles, élevage...) ou naturelles (déjection animale). La turbidité (l'aspect trouble de l'eau) est liée soit à la présence de fer, qui peut être une altération à elle seule, soit à la présence de matières en suspension (MES). Les matières en suspension, constituées de micro particules (argiles, plancton...) proviennent le plus souvent des eaux de ruissellement après des épisodes orageux : la pluie s'engouffre par des voies de cheminement préférentiel, rejoint les nappes (Gérin *et al.*, 2003). Néanmoins si on les place dans le plan (F2-F3) on s'aperçoit que NO_3^- se dissocie de l'axe F2 et s'éloigne du 3^e regroupement et on remarque l'arrivée de NO_2^- , PO_4^{3-} , Ni, Potred et Temp dans ce groupe. L'axe F2 peut donc être désigné par le pluvio-lessivage des sels surfaciques en saison des pluies. Par ailleurs, ces regroupements laissent supposer que les variables appartenant à un même groupe ont des comportements incomparables dans les eaux souterraines. Cependant, les variables tels que Cond, Temp, TDS, Potred affichent une certaine corrélation avec l'axe F2. Cela suggère certainement une origine naturelle. Enfin la troisième composante (F3) représente environ 18,09 % de la variance totale. Elle est associée au Mg et Zn. Leur présence pourrait être d'origine naturelle. De l'analyse en Classification Hiérarchique Ascendante (CHA), on retient que les variables concernées évoluent de la même façon et sont tributaires d'un même phénomène ou de phénomènes semblables. Les polluants sont rarement rejetés directement dans les nappes souterraines. Leur présence est due à leur transfert depuis la surface, au cours duquel différents processus physiques, chimiques et biologiques vont jouer un rôle dans l'atténuation, le délai de transfert, la distance de propagation et la rétention plus ou moins réversible du produit (Almaric *et al.*, 2003). Les principaux processus qui contrôlent le transfert d'éléments sont la convection, la dispersion, les échanges avec la phase solide (adsorption sur la matière organique ou la matrice rocheuse, précipitation/dissolution) et la dégradation (chimique ou biologique). Les propriétés intrinsèques des polluants (solubilité, adsorption, dégradabilité), les propriétés intrinsèques des milieux traversés, (perméabilité, teneur en matière organique, degré d'oxydation), les interactions entre les polluants et le milieu ainsi que le contexte climatique sont autant de facteurs qui contrôlent ces différents processus de migration des polluants (Lemère *et al.*, 2001). La vulnérabilité d'une nappe phréatique face aux polluants dépend des propriétés

du sol, en particulier de sa perméabilité ainsi que des propriétés de l'aquifère telle que la variation de la hauteur de la nappe, le taux de recharge, la vitesse de percolation, etc (Lake *et al*, 2003). L'utilisation des analyses ACP a mis en évidence des comportements comparables pour certains métaux dans les eaux. On retient deux regroupements (Cu, Pb, K, Na) et (Cd, Ca, Fe), indiquant une même source de contamination, liée aux effluents miniers chargés de métaux provenant des activités minières. Cela nous permet de confirmer les déductions faites avec les matrices de corrélations. En effet, celles-ci avaient montré des comportements comparables pour Cd, Fe, K, Na dans les eaux souterraines. Les analyses ACP ont permis aussi de comprendre que le pompage excessif des eaux souterraines et des eaux de surface pour le traitement des minerais vont entraîner des appels d'eaux, et agir sur la qualité et la quantité des eaux souterraines. Elle rend compte d'une pollution due aux activités minières aurifères, aux eaux usées et à l'agriculture.

Conclusion

Cette étude a permis d'évaluer la contamination des eaux souterraines et de déterminer l'origine de leur pollution dans la zone de Zouan-Hounien. Les résultats de l'indice WQI ont montré que dans l'ensemble des eaux étudiées 28,6% sont de qualité impropre à la boisson en saison pluvieuse et en saison sèche 85,7%. Les analyses ont montré que la mauvaise qualité de la majorité des eaux souterraines de la zone d'étude est due au pH, à la turbidité, aux concentrations en Fe et Pb surtout en saison sèche. Par conséquent, leur consommation ou utilisation pour l'irrigation agricole de ces eaux souterraines pourrait constituer les risques de bioaccumulation et de toxicité et engendrer des impacts négatifs sur la santé de la population. Dans l'ensemble, cette étude a permis de montrer que la pollution des eaux souterraines de la nappe de la région Ity-Floleu est fortement liée à l'intensification des activités minières aurifères mais aussi aux pratiques agricoles et aux rejets domestiques que connaît la région du bassin de Cavally. Face à cette situation inquiétante qui devient critique malheureusement dans le temps, il est important de faire un suivi régulier et permanent de la qualité de l'eau afin de corriger et préserver la nappe du bassin Cavally qui reste une source importante pour l'alimentation en eau potable de cette région. Au terme de cette étude, nous recommandons aux autorités compétentes qu'à court terme l'alimentation des villages de la zone d'étude pourrait être assurée par des forages captant les eaux des nappes profondes et une éducation sanitaire en encourageant les sensibilisations. D'autre part assurer l'approvisionnement en eau par le réseau d'adduction moderne fournissant de l'eau potable à ces villages.

References:

1. AFNOR, (1997). Qualité de l'Eau. Tome 1: Terminologie, échantillonnage et évaluation des méthodes. 3^e édition. Paris, France.
2. Agassounon, D. T. M., Alassane, A., Mama, D., Ahanhanzo, C., Toukourou, F., & Agbangla, C. (2010). Contrôle des paramètres physicochimiques des eaux en bouteille vendues à Cotonou. Bulletin d'Informations de la SOACHIM, 7.
3. Ahonon, A. (2011). Evaluation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de surface dans les zones montagneuses du sud-ouest du Togo : cas du canton de la vie. (Mémoire de Master international en Environnement Eau et Santé). Université de Lome, 35.
4. Almasri, M. N., & Kaluarachchi, J. J. (2004). Assessment and management of long-term nitrate pollution of ground water in agriculture-dominated watersheds. *Journal of Hydrology*, 295(1-4), 225-245. DOI 10.1016/j.jhydrol.2004.03.013
5. Amalric L., Baran N., Jeannot R., Marti J.C., & Mouvet C., 2003. Les mécanismes de transfert des produits phytosanitaires du sol vers les nappes et les méthodes d'analyse des produits phytosanitaires dans les eaux. BRGM/RP-51590-FR, Paris, France, 116 p.
6. Belhadj, S., Yahiya-Dahmana, S., & Dahmana, A. E. (2018). Analyse de la qualité de l'eau suivant les normes de potabilité de quelques sources naturelle dans la commune de Feraoun (Wilaya Bejaia).
7. Chapman, D., & Kimstach, V. (1996). selection of water quality variables. *Water Quality Assessments-a Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*. Chapman Edition, 2nd ed. E & FN Spon, London, pp. 59-126.
8. Coulibaly, K. (2005). Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau des puits de certains quartiers du district de Bamako. Faculté de médecine de pharmacie thèse doctorat d'état.
9. De Villers, J., Squilbin, M., & Yourassowsky, C. (2005). Qualité physico-chimique et chimique des eaux de surface: cadre général. Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement / Observatoire des Données de l'Environnement, p. 2-16.
10. Degbey, C., Makoutode, M., Fayomi, B., & De Brouwer, C. (2010). La qualité de l'eau de boisson en milieu professionnel à Godomey en 2009 au Bénin Afrique de l'Ouest. *J Int Santé Trav*, 1, 15-22.
11. Ettien, D. Z. (2005). Etude d'évaluation de l'impact des exploitations minières sur l'environnement et les populations en Afrique occidentale : Cas de la mine d'or d'Ity dans la région semi-montagneuse de l'Ouest de la Côte d'Ivoire. Apport du Système d'Informations Géographiques (S.I.G) et de la télédétection. (Thèse Unique de Doctorat). Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 178 p.

12. Ettien, D. Z. (2010). Exploitation industrielle des gisements d'or et dynamique spatiale du terroir d'Ity dans l'Ouest de la Côte d'Ivoire. Une étude à base de la télédétection n°8, 15 p.
13. Facchinelli, A., Sacchi, E., & Mallen, L. (2001). Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils. *Environmental pollution*, 114(3): 313-324.
14. Garbarino, J. R., Hayes, H. C., Roth, D. A., Antweiler, R. C., Brinton, T. I., & Taylor, H. E. (1995). Heavy Metals in the Mississippi River. U. S. Geological Survey Circular 1133, Virginia.
15. Gérin, M., Gosselin, P., Cordier, S., Viau, C., Quénel, P., & Dewailly, E. (2003). Environnement et santé publique - Fondements et pratiques. Editions Tec & Doc, Acton Vale / Paris
16. Ghislain, T. Y., Feumba, R., Wethe, J., Ekodeck, G. E., & De Marsily, G. (2012). Evaluation de l'adéquation des eaux souterraines à des fins domestiques et d'irrigation: une étude de cas du bassin de la rivière Mingoa, Yaoundé, Cameroun. *Journal des ressources en eau et de la protection*, 4: 285-293.
17. Gibrilla, A., Osaé, S., Akiti, T., Adomako, D., Ganyaglo, S. Y., Bam, E. P., K., & Hadisu, A. (2010). Etudes hydrogéochimiques et de la qualité des eaux souterraines dans la partie nord du bassin de la rivière Densu au Ghana. *Journal des ressources en eau et de la protection*, 2: 1071-1081. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2010.212126>
18. Hade, A. (2003). Nos lacs: les connaître pour mieux les protéger. Les Editions Fides.
19. Kanohin, F., Otchoumou, E., Yapo, O. B., Dibi, B., & Bonny, A. C. (2017). Caractérisation physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines de Bingerville. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 11(5), 2495-2509.
20. Kelome, N. C., Dovonou, L., & Lawani, R. (2014). Problématique De L'eau Desservie A La Population Par Les Postes D'eau Autonomes Prives Dans La Commune De Ketou. *Journal de la Recherche Scientifique de l'Université de Lomé*, 16(1), 15-23.
21. Konan, K. S., Kouassi, A. M., Adingra, A. A., Dongui, B. K., & Gnakri, D. (2005). Variations saisonnières des paramètres abiotiques des eaux d'une lagune tropicale: la lagune de Grand-Lahou, Côte d'Ivoire. *Editorial Advisory Board e*, 21(3), 376-393.
22. Lake I. R, Lovett A. A., Hiscock, K. M., Betson, M., Fole, A., Sünnerberg, G., Evers, S., & Fletcher, S. (2003). Evaluating factors influencing groundwater vulnerability to nitrate pollution: developing the potential of GIS. *Journal of Environmental Management*, 68(3): 315–328 .

23. Lasm, T., De Lasm, O., Oga, Y.M-S., Youan Ta, M., Baka, D., Kouamé, F., & Yao, K. T. (2011). Caractérisation hydrochimique des aquifères fissurés de la région de San-Pedro (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 5(2): 642-662.
24. Leclerc, H. (2008). Nitrates de l'eau d'alimentation et risques pour la santé. *Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France. CODEN CRAFEQ*, 94(3): 14-24.
25. Lemièrre B., Seguin J. J., Guern C., Guyonnet D., & Baranger P. (2001). Guide sur le comportement des polluants dans les sols et les nappes. Applications dans un contexte d'évaluation détaillée des risques pour les ressources en eau. BRGM/RP-50662, France, BRGM éditions, 300, 103 p.
26. Liu, W. X., Li, X. D., Shen, Z. G., Wang, D. C., Wai, O. W. H., & Li, Y. S. (2003). Multivariate statistical study of heavy metal enrichment in sediments of the Pearl River Estuary. *Environmental pollution*, 121(3): 377-388.
27. Loukman, B., Nakolendousse, S., Nour, A. M., & Nguinambaye, M. M. (2017). Caractérisation hydrochimique de la nappe de Yao et ses environs: relations entre eaux de surface (lac-Fitri) et eaux souterraines. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 11(3), 1336-1349.
28. Matini, L., Moutou, J. M., & Kongo-Mantono, M. S. (2009). Evaluation hydro-chimique des eaux souterraines en milieu urbain au Sud-Ouest de Brazzaville, Congo. *Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie*, 5(1).
29. Milesi, J. P., Feybesse, J. L., Ledru, P., Dommanget, A., Ouedraogo, M. F., Marcoux, E., ... & Lagny, P. (1989). Les minéralisations aurifères de l'Afrique de l'Ouest, leur évolution lithostructurale au protérozoïque inférieur. *Chronique de la recherche minière, France*, 497, 3-98.
30. Naho, J. (1988). Cycle supergène de l'or en milieu ferralitique. Exemple du gisement d'or d'Ity en Côte d'Ivoire. (Thèse de Doctorat ès Géoscience et Matière Première). Vandoeuvre-les-Nancy, INPL.
31. Oga, M. S, Gnamba, F. M, Lasm, T., Gnanngne, T., Baka, D., Soro, N., & Biemi J. (2010). Caractérisation physico-chimique des eaux souterraines de Katiola (Centre-Nord de la Côte d'Ivoire). *BIOTERRE, Revue Internationale des Sciences de la Terre*, 10: 7-25.
32. OMS, (2004). Directives de qualité pour l'eau de boisson. OMS, Genève, 110 p.

33. OMS, (2011). Nitrates et nitrites dans l'eau de boisson. Document de référence pour le développement de l'OMS. Directives pour la qualité de l'eau de boisson. 23p.
34. OMS (2016). Pauvreté. Thèmes de santé. <https://www.who.int/hdp/poverty/fr/>
35. Ouedraogo, M. (2001). Contribution à l'étude de l'impact de la variabilité climatique sur les ressources en eau en Afrique de l'Ouest. Analyse des conséquences d'une sécheresse persistante: normes hydrologiques et modélisation régionale. (Thèse de doctorat). Université de Montpellier II, France, 257 p.
36. Papon, A. (1973). Géologie et minéralisation du Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire: Synthèse des travaux de l'opération SASCA 1962-1968. Mémoire du BRGM, 80, 285 p.
37. Ramakrishnaiah, C. R., Sadashivaiah, C., & Ranganna G. (2009). Assessment of Water Quality Index for the Groundwater in Tumkur Taluk, Karnataka State, India. *Journal of Chemistry*, 6(2): 523-530.
38. Robertson, W. D., Schiff, S. L., & Ptacek, C. J. (1998). Reviews of Phosphate Mobility and Persistence in 10 Septic System Plumes. *Groundwater*, 36(6): 1000-1010.
39. Rodier, J., Bazin, C., Broutin, J.P., Chambon, P., Champsaur, H., Rodi, L. (1996). L'analyse de l'eau naturelle, eaux résiduaires, eau de mer, 8^{ème} édition, Dunod, Paris, France, 1383p.
40. Rodier J., B. Legube, N. Marlet, R., & Brunet (2009). L'analyse de l'eau. 9^e édition, Dunod, Paris, France, 1579 p.
41. Servat, E., Paturel, J. E., Kouame, B., Travaglio, M., Ouedraogo, M., Boyer, J. F., ... & Marieu B. (1998). Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et centrale. *IAHS PUBLICATION*, 323-338.
42. Shrestha, M. S., Rijal, K., & Pokhrel, M. R. (2016). Assessment of heavy metals in deep groundwater resources of the Kathmandu Valley, Nepal. *Journal of Environmental Protection*, 7(4): 516-531.
43. Vo Quang Tri, & M de Guyon, (1966). Etude générale de la région de Man. Rapport de synthèse agricole. Bureau pour le développement de la production agricole (B.D.P.A), 7-17.