

Distribution spatiale de la pollution aux métaux lourds des ressources en eaux des sites miniers en exploitation de la localité de Bétaré-oya, Est_Cameroun

**François NTEP^{1*}, Emmanuel AGUIZA ABAI², Gabriel Alain ASSOA ANGOA³
et Clotaire NGANGUE ESSOUMAM³**

¹ *Université de Maroua, Ecole Nationale Supérieure des Mines et des Industries Pétrolières, Département d'Exploration Minière Pétrolière Gazière et des Ressources en Eau, BP 08 Kaélé, Cameroun*
² *Université de Maroua, Ecole Nationale Supérieure des Mines et des Industries Pétrolières, Département de Sécurité industrielle Qualité et Environnement, BP 08 Kaélé, Cameroun*
³ *Université de Maroua, Département d'Exploration Minière Pétrolière Gazière et des Ressources en Eau, BP 08 Kaélé, Cameroun*

(Reçu le 17 Mars 2025 ; Accepté le 16 Mai 2025)

* Correspondance, courriel : francoisntep10@gmail.com

Résumé

Le but de ce travail est de développer un modèle permettant de décrire le comportement des métaux lourds dans les ressources en eaux des sites miniers en cours d'exploitation dans la localité de Bétaré-oya. Les analyses de la campagne de prélèvements effectués au mois de juillet 2024 de six (06) échantillons d'eau souterraine issus d'un (01) puits, un (01) forage et quatre (04) des eaux de surface du cours principal et de ses affluents. Les résultats obtenus des paramètres physiques mesurés in situ et au laboratoire ont montré que les eaux ont des valeurs de pH comprises entre 5,4 et 6,6 ; qu'elles sont faiblement minéralisées, avec un taux d'oxygène dissout compris entre 1,4 et 7,6 ; avec des températures variant de 25 à 31 °C. L'indice de pollution des métaux lourds a permis de conclure que l'aluminium (Al), le fer (Fe) ainsi que le mercure (Hg) sont à l'origine de la pollution constatée dans les eaux ce site. Toutefois l'on note un abattement considérable de la pollution en ces éléments polluants aussi bien le long du principal cours drainant que de la surface en profondeur d'un point de prélèvement à un autre du site.

Mots-clés : *ressources en eaux, orpaillage semi-mécanisé, pollution métallique, Bétaré-Oya, Région de l'Est-Cameroun.*

Abstract

Spatial distribution of heavy metal pollution in water resources at mining sites in operation in the locality of Bétaré-oya, East Cameroon

The aim of this study is to develop a model that describes the behavior of heavy metals in the water resources of mining sites in the Bétaré-Oya area. The sampling campaign, which took place in July 2024, involved analyzing six groundwater samples from one well and one borehole, as well as four surface water samples from the main river and its tributaries. Results from the physical parameters measured in situ and in the laboratory showed that the waters had pH values ranging from 5.4 to 6.6, were poorly mineralized with

dissolved oxygen levels ranging from 1.4 to 7.6, and had temperatures ranging from 25 to 31°C. The heavy metal pollution index indicates that aluminum (Al), iron (Fe), and mercury (Hg) are the primary pollutants in the water at this site. However, there was a considerable reduction in pollution from these metals along the main drainage course and from the surface to the depths at different sampling points on the site.

Keywords : *water resources, semi-mechanised gold washing, metal pollution, Bétaré-Oya, East Cameroon Region.*

1. Introduction

L'exploitation minière de l'or joue un rôle essentiel dans de nombreuses économies, offrant des possibilités de croissance et de développement. Cependant, l'exploitation de l'or pourrait avoir des conséquences environnementales significatives, en particulier sur la qualité des eaux souterraines et les systèmes hydrogéologiques [1]. Les opérations d'extraction de l'or impliquent souvent l'utilisation de produits chimiques tels que le cyanure, le mercure et d'autres métaux lourds, le mercure et d'autres métaux lourds, qui peuvent s'infiltrer dans le milieu environnant et potentiellement contaminer les sources d'eau souterraine [2]. Comprendre comment de ces contaminants dans le sous-sol et comment ils interagissent avec les aquifères est essentielle pour une gestion efficace de l'environnement et la durabilité des ressources [3]. Le Cameroun regorge de nombreuses ressources minières comme le diamant, l'or, la bauxite, l'uranium, le cobalt, le rutile etc., la région de l'Est et plus particulièrement l'arrondissement de Bétaré-oya est l'une des principales destinations où l'on trouve la plus grande partie de ses ressources. L'or est principal minerai sollicité dans cette zone et son exploitation y est semi-mécanisée ou artisanale [4]. Dans le but de rendre le cadre réglementaire de l'activité minière plus attractive pour les investisseurs locaux et étrangers. On observe des réformes de la loi qui régit l'expansion minière au Cameroun. Un vent nouveau qui vise l'amélioration des conditions de gouvernance dans le secteur minier camerounais notamment avec la création d'organismes de mise en œuvre de la politique minière. Parmi les innovations figurent les créations des organismes à l'instar du Cadre d'Appui et de Promotion de l'Activité Minière (CAPAM), l'Agence Nationale de Gestion des Ressources Minérales (ANGERM), le Comité National de l'Eau et de l'Environnement du Cameroun (CNEM), la Direction Générale des Etudes et de la Maintenance (DGEM) ou le Projet de Renforcements des Capacités dans le Secteur Minier (PRECASEM) [4]. Bien que la localité de Bétaré-Oya soit très convoitée par son potentiel en ressources aurifères, les exploitations artisanales qu'effectuent les locaux et celles de la semi-mécanisation des sociétés étrangères sont à l'origine de multiples dégâts notamment la détérioration de la qualité des ressources en eau en particulier. La présente recherche qui se fonde sur l'étude la contamination à la pollution métallique et leur abattement dans les ressources en eaux des sites miniers en cours d'exploitation aurifère qui a pour objectif de faire une évaluation des teneurs en éléments polluants surtout métalliques issues des activités au sein et aux alentours ses sites d'orpaillage [4].

2. Matériel et méthodes

2-1. Présentation du site d'étude

Bétaré-Oya est le chef-lieu de l'arrondissement du même nom dans le département du *Lom et Djerem*, région de l'Est au Cameroun. Située entre les coordonnées 14°05' et 14°10' de la longitude Est et entre 5°35' et 5°40' de la latitude Nord elle couvre une superficie de 12 600 km² [5, 6]. La zone d'étude pour sa part s'étend du Nord au Sud, d'amont en aval du cours Lom depuis Bangbel jusqu'au bac en passant par Mari, et Mbal comme le présente la **Figure 1** de la carte de localisation de l'arrondissement de Bétaré-Oya.

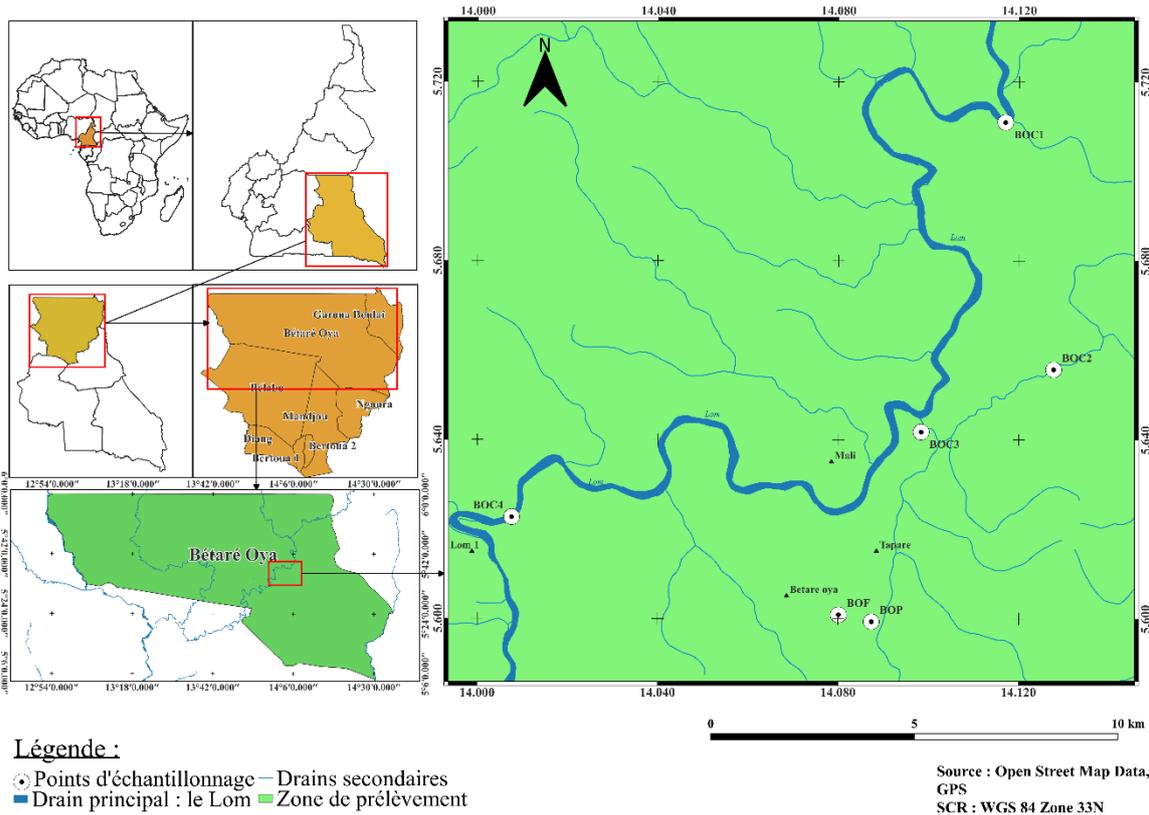


Figure 1 : Carte de la localisation de la zone d'étude

2-1-1. Caractéristiques climatiques et hydrogéographiques

Le climat qui règne ici est caractérisé par quatre saisons repartis comme suite : une grande saison de pluie qui s'étend de la mi-août à mi-novembre, une grande saison sèche de mi-novembre à février ; une petite saison de pluie qui va du mois de mars à mai et une petite saison sèche entre juillet et mi-août [7]. C'est un climat humide subéquatorial caractéristique grandement influencé par la forêt du Congo. Le pic de pluviosité est habituellement observé au mois d'octobre quand la précipitation atteint 287 mm. La moyenne annuelle des précipitations est de 1490.7 mm et la température moyenne de 24.3°C [8]. La **Figure 2** est le diagramme ombrothermique de la localité de Bétaré-Oya.

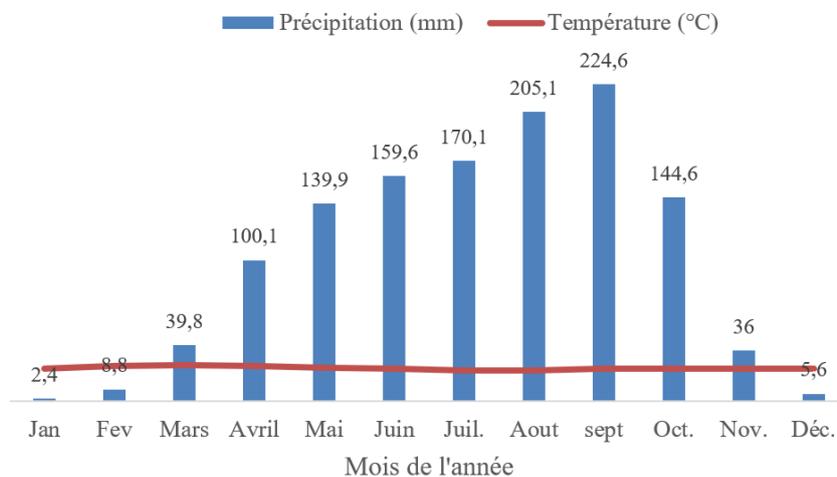


Figure 2 : Diagramme ombrothermique de la localité de Bétaré-Oya de l'année 2024

La végétation est dominée par la savane dans laquelle on observe des forêts marécageuses [7]. Le bassin du Lom appartient au grand bassin versant de la Sanaga. Deux types de nappes souterraines en bicouche sont identifiables dans le secteur de Bétaré-Oya. Un aquifère supérieur continu situé à environ 20 m profondeur en dessous duquel on retrouve un aquifère plus profond, fissuré discontinu. La première nappe est exploitée pour des puits, la qualité de l'eau y est parfois douteuse. La seconde est produite par les forages, l'eau qui en provient est de meilleure qualité [6]. La population s'approvisionne à majorité en eau dans les rivières (46 %), dans les sources et les puits (44 %) et seulement 10 % accède à une eau de bonne qualité [9]. La **Figure 3** est une esquisse du réseau hydrographique de la zone d'étude. Les sols qui recouvrent les formations géologiques à Bétaré-Oya sont principalement ferralitiques [9].

2-1-2. Cadre géologique et pédologique

Le secteur de Bétaré-Oya est situé sur le socle Panafricain du Cameroun. Il est compris entre deux zones de cisaillement : au Nord par le cisaillement de l'Adamaoua et au Sud par celui de la Sanaga [7,8]. Les roches dominantes sont para et ortho-dérivées : ce sont des schistes, des micaschistes, des orthogneiss de Wakaso et de Ndokayo, des quartzites recoupés par des granitoïdes panafricains et des conglomérats de Mari, des granites post-tectonique de Ngibi et Kongolo et des granites intrusifs de la « série de Lom » [10, 11]. Ces formations géologiques présentent une foliation orientée NE-SO correspondant à la direction du cisaillement dextre et senestre de la zone de cisaillement centrale du Cameroun [10]. Les minéralisations de la série de Lom sont métamorphiques-hydrothermales, de nature polymétallique, elles sont parfois diffuses dans la masse, ou associées à une gangue à silice, à barite et à calcite dans des veines de quartz. C'est un site extrêmement riche en veines de quartz de plusieurs générations successives, dont certaines très riches en or, qui est exploité de manière traditionnelle. Les sites d'exploitation se présentent par une émergence sauvage et très désordonnée des puits et des carrières comme des galeries des bousiers [11]. L'on dénombre deux principaux types de minéralisation dans les gisements alluviaux et éluviaux, et une minéralisation aurifère issue de veines de quartz sulfuré contenant de l'or, de la pyrite, de la galène, de la chalcoppyrite et de l'hématite [12]. L'or plus fin est extrait par amalgamation avec le mercure et parfois par flottation avec le cyanure. En plus de l'or, on retrouve aussi des gisements de sables et d'autres matériaux de carrières. La **Figure 3** est une esquisse géologique de l'arrondissement de Bétaré-Oya.

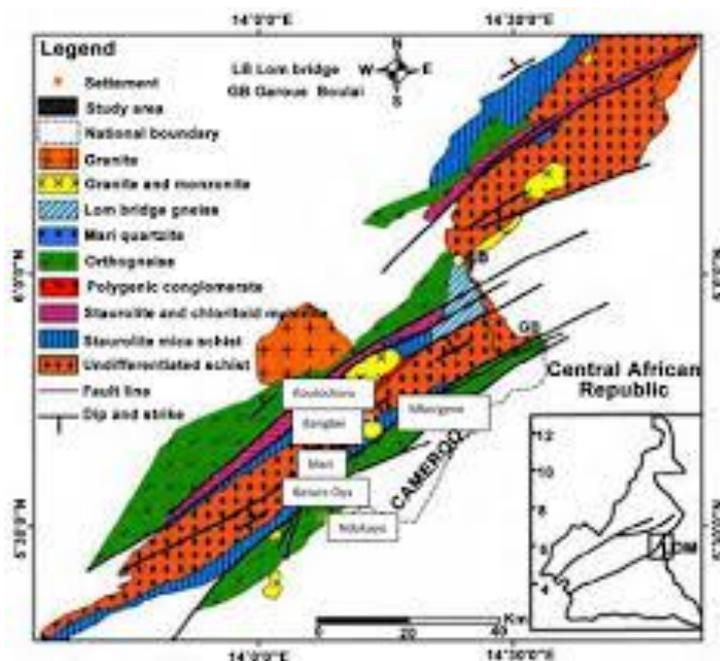


Figure 3 : Carte géologique de la zone d'étude [11]

2-2. Suivi de la distribution de la pollution dans les ressources en eaux

2-2-1. Échantillonnage

La campagne d'échantillonnage s'est effectuée au mois de juillet 2024 à différents points dans les sites miniers en cours d'exploitation à Bétaré-Oya. Un total de six (06) échantillons d'eau a été prélevé. Quatre (04) échantillons des eaux superficielles de l'amont vers l'aval dans le fleuve *Lom* et *Mari* son principal affluent et deux échantillons d'eau souterraine un (01) dans un puits et un (01) d'un forage. Les échantillons ont été prélevés dans des bouteilles en polyéthylène d'un litre et demi préalablement lavées et rincées à l'eau distillée. Tous les cours d'eau qui drainent la zone de Bétaré-Oya se jettent dans le Lom. Le secteur de travail a donc été circonscrit autour du Lom. Le **Tableau 1** récapitule les prélèvements réalisés sur six points d'amont en aval du Lom ainsi que leurs localisations et quelques observations. Les échantillons prélevés dans les cours d'eau portent le code BOC (Bétaré-Oya Cours) ; l'échantillon BOP provient du puits (Bétaré-Oya Puits) et l'échantillon BOF (Bétaré-oya Forage) a été prélevé dans un forage où se ravitaillent les populations, il est situé à l'entrée de la ville de Bétaré-Oya. Deux échantillons ont été sélectionnés pour l'analyse du Cyanure total (BOC-1 et BOF) : le premier en amont du cours d'eau Lom et le second dans le forage comptant comme représentatif de l'eau de consommation de la population.

Tableau 1 : Récapitulatif de la campagne d'échantillonnage

Code	Nombre	Points de prélèvement			Observations	Point de prélèvement
		Repérage		Altitude		
		Latitude	Longitude			
BOC-1	1	N05°42'39.53"	E014°07'01.23"	689	Bon débit 03 sites actifs. Eau trouble	Lom Amont
BOC-2	1	N05°39'20.55"	E014°07'39.76"	688	Débit moyen 07 sites actifs. Eau rougeâtre	Mari Amont
BOC-3	1	N05°38'30.34"	E014°05'54.03"	681	Débit faible 02 sites actifs. Eau peu claire	Mari Aval
BOC-4	1	N05°37'21.79"	E014°00'27.32"	680	Profond. 02 sites actifs	Lom Aval
BOP	1	N05°35'57.68"	E014°05'14.51"	743	Eau trouble utilisée par la population	Puits Eau de sub-surface
BOF	1	N05°36'03.18"	E014°04'48.30"	779	Eau claire consommation directe	Forage Eau souterraine

2-2-2. Détermination des paramètres physiques

Le pH, la température, la conductivité électrique, la turbidité, l'oxygène dissout, les solides totaux dissouts et la conductivité électrique ont été mesurés directement sur le terrain à l'aide d'une sonde multi paramètre de marque *Hanna HI9829*. La calibration est rapide et facilement réalisable avec une solution d'étalonnage certifiée commune aux différents paramètres. La sonde est rincée à l'eau distillée après les mesures sur chaque échantillon.

2-2-3. Détermination des métaux lourds

Les métaux lourds ont été analysés au laboratoire du Centre Pasteur du Cameroun par Spectrométrie à Emission Optique couplée à l'ICP. Une gamme de huit (08) éléments (Al, Fe, Mn, CN, As, Hg, V et Cd) a été

sélectionnée à cet effet sur la base de la composition chimique des roches et des sols, tirée des travaux des chercheurs à l'instar de [10 - 13]. Le choix du mercure a en plus été motivé par son utilisation pour l'amalgamation dans l'exploitation de l'or. Les résultats des analyses seront présentés sous forme de tableaux et interprétés par des histogrammes et des courbes.

2-2-4. Indice de pollution des métaux lourds (HPI)

Le HPI est un indice proposé par [14]. C'est un outil très utile pour évaluer la pollution globale des masses d'eau par les éléments trace métalliques (ETM) [15 - 18]. Ainsi, le concept d'un index de pollution a été introduit dans de nombreuses études pour identifier la contamination multiélément qui se traduit par une augmentation de la toxicité métallique [19]. Cette méthode est basée sur la qualité arithmétique pondérée. L'indice de pollution des métaux permet d'évaluer la pollution globale en métaux lourds dans les eaux étudiées. Il est calculé à partir de la pondération unitaire (W_i), des sous indices et des normes recommandées (S_i) par l'OMS, à l'aide des **Formules** suivantes [6 - 19] :

$$W_i = k / S_i ; \quad (1)$$

$$Q_i = 100 \times V_i / S_i ; \quad (2)$$

$$IP = \frac{\sum_{i=1}^n W_i Q_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (3)$$

w_i est compris entre 0 et 1 et représente le poids attribué à chaque métal. W_i est la pondération unitaire, c'est l'inverse de la norme recommandée (S_i) du paramètre i correspondant. L'indice de pollution critique correspond à une valeur de 100. L'indice a été calculé pour chacun des éléments à partir des valeurs de concentration moyenne en mg/l. Le **Tableau 3** présente les indices de pollution des métaux dans les eaux analysées en comparaison avec les normes de l'OMS [20] pour l'eau de consommation.

3. Résultats et discussion

3-1. Résultats

3-1-1. Caractéristiques physiques des ressources en eaux des sites miniers

Les différentes valeurs des paramètres physiques suscités testés in-situ dans le site d'étude avant prélèvement dans les sites miniers de Bétaré-Oya sont consignées dans le **Tableau 2**.

Tableau 2 : Résultats d'analyses des paramètres physiques testés sur le site de prélèvement

Paramètre	Paramètres physiques						Saturation
	pH	Température	Conductivité Electrique	Turbidité	Oxygène dissout	TDS	
Unité	-	(°C)	(μ S/cm)	(NTU)	(mg/LL)	(mg/L)	%
BOC-1	6,30	28,60	22,50	428,00	4,60	10,00	51,11
BOC-2	6,60	26,00	30,00	520,00	2,70	13,00	30,00
BOC-3	5,80	25,00	10,00	59,00	1,35	3,50	15,00
BOC-4	6,29	27,30	20,90	310,00	3,60	9,60	40,00
BOP	6,00	31,00	44,10	286,00	7,60	20,00	84,44
BOF	5,87	27,90	80,00	62,00	6,00	30,00	66,67

3-1-2. Distribution spatiale des métaux lourds dans le site minier de Bétaré-Oya

3-1-2-1. Dynamique de la contamination à (Al) et au (Fe)

Les concentrations en aluminium (Al) et en fer (Fe) dans les différents points de prélèvement du site minier de Bétaré-Oya sont présentées sur la **Figure 4**. La dynamique en (Al) est comprise entre 2,800 et 9,833 mg/L respectivement aux points BOC-1 et BOC-2 alors qu'aux points BOF et BOP elle varie de 0,001 à 0,010 mg/L respectivement. Sur la même **Figure 4**, les concentrations en fer, vont de 2,291 à 20,800 mg/L et de 0,003 à 1,500 mg/L respectivement de l'amont en aval et de nappes superficielles vers les nappes profondes. La dynamique des concentrations aussi bien en Al qu'en Fe dans les ressources en eaux au niveau des sites miniers de Bétaré-Oya même ceux qui sont situés loin des sites se caractérisent en général par de fortes teneurs en ces éléments polluants mais toutefois, présentent un abattement considérable aussi bien dans le sens latéral de l'amont vers l'aval du principal cours d'eau drainant d'une part mais aussi de dans le sens vertical.

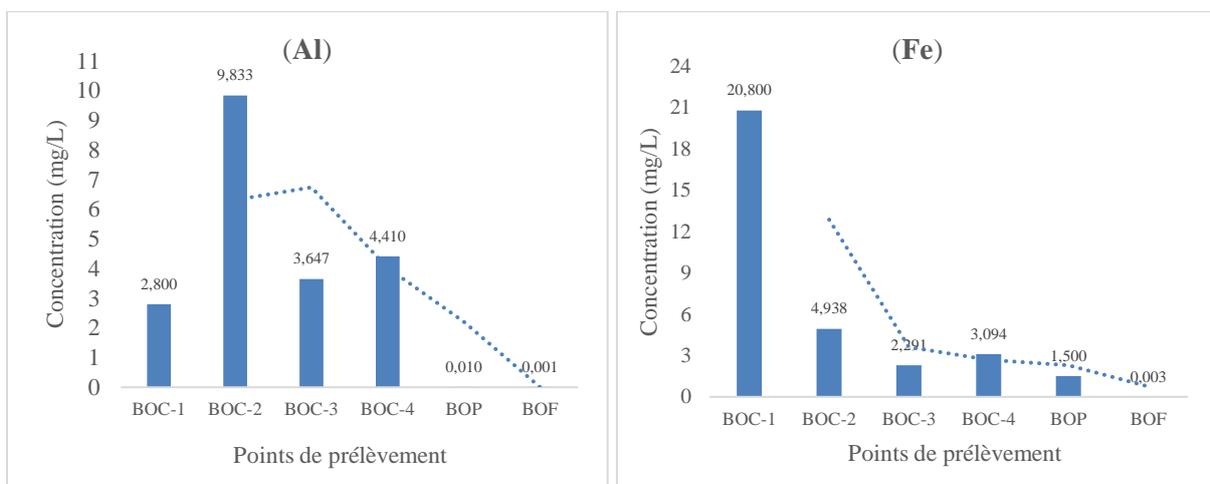


Figure 4 : Dynamique de la contamination à l'Al et au Fe dans le site

La **Figure 5** donne la visualisation des concentrations en Manganèse (Mn) et en Arsenic (As) quel que soit l'élément polluant présente une allure uni modale dans les différents points de prélèvement du site minier. De cette figure l'on remarque que des concentrations en élément (Mn) vont de 0,012 à 51,300 mg/L de l'amont vers l'aval et reste nul tant dans l'eau de puits que du forage. Pour l'As, seul au point BOC-2 que l'on observe une concentration appréciable le long du cours drainant, alors que tout comme l'Al elle est proche de zéro de la surface vers la profondeur.

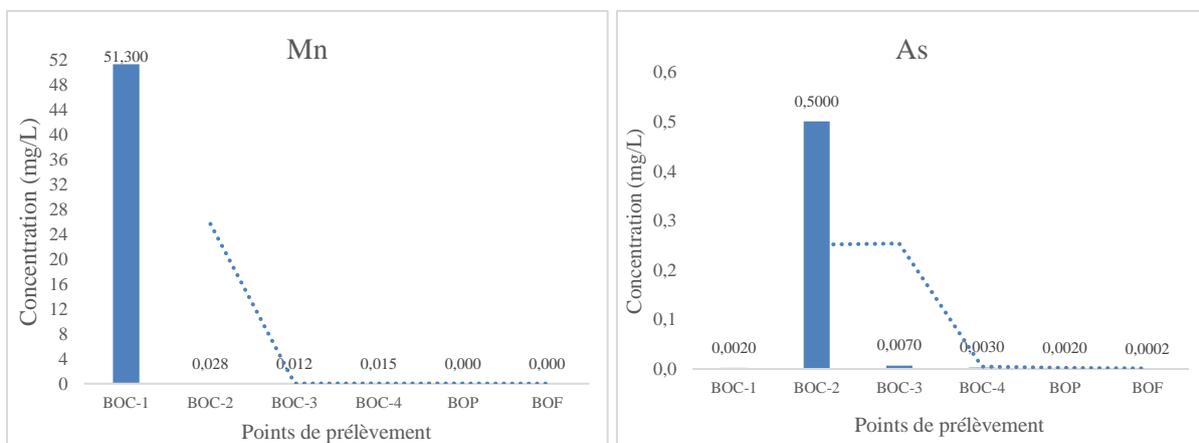


Figure 5 : Dynamique de la contamination au Mn et à l'As dans le site

Quel que soit le point de prélèvement surtout à partir du point BOC-2, les teneurs au vanadium, tournent autour de zéro ; seul le prélèvement au point BOC-1 a présenté une teneur relativement faible comparativement aux autres de l'ordre de 0,020. Les teneurs au Cadmium sont conséquentes, elles évoluent de 0,002 mg/L à 0,164 mg/L. La concentration la plus faible (0,012 mg/L) correspondant à l'échantillon du forage. La **Figure 6** montre la dynamique des teneurs au vanadium et au cadmium.

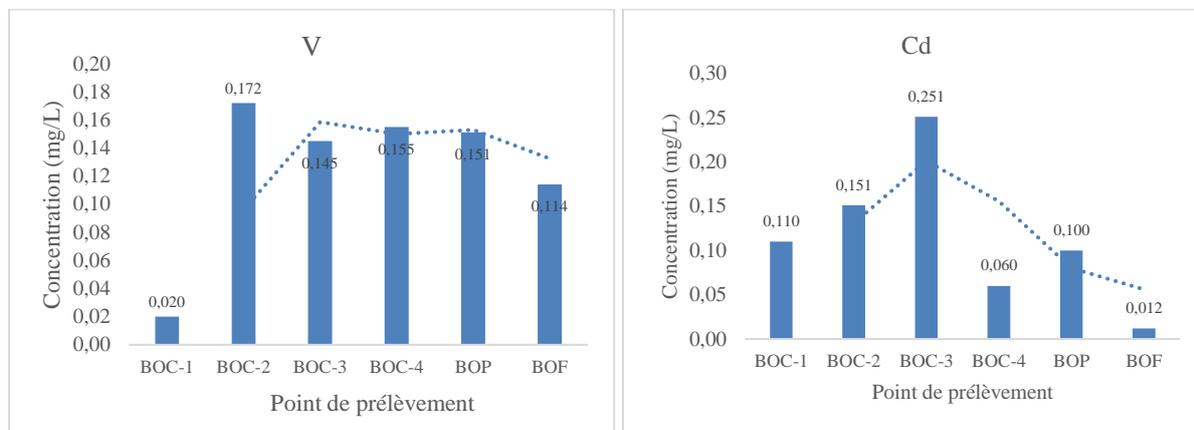


Figure 6 : Dynamique de la contamination au (V) et au (Cd) dans le site

Les teneurs en Hg varient de 0,015 à 0,034 mg/L le long du cours drainant. C'est au niveau de l'échantillon **BOC-3** confluence entre les eaux de *Mari* et le *Lom* drain principal que la plus grande concentration a été enregistrée ; alors que la minimale est enregistrée au niveau de l'eau du forage échantillon adressé **BOF** (**Figure 7**) ; l'on a des concentrations en cyanure allant de 0,013 mg/L au niveau de l'échantillon BOC-1 point en amont du site à 0,001 mg/L au niveau de l'échantillon BOF des eaux du forage.

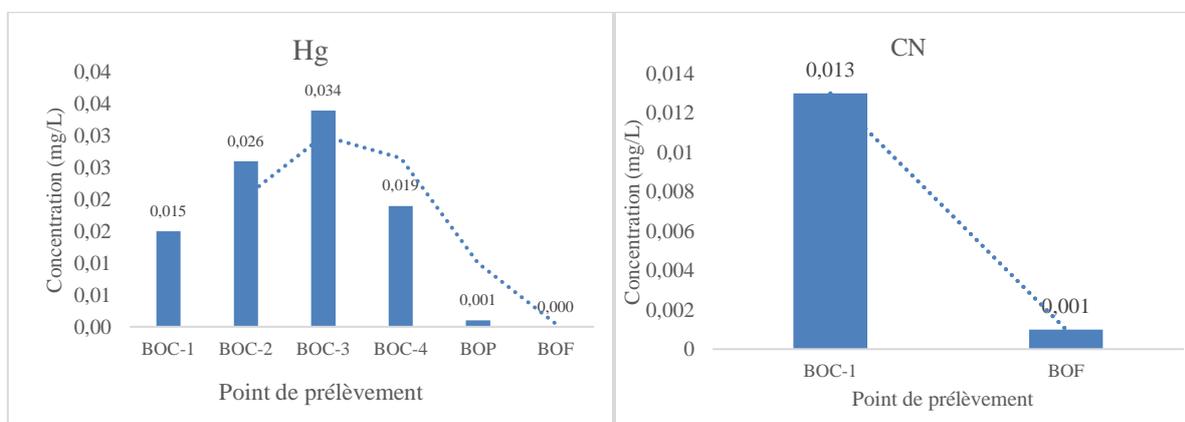


Figure 7 : Dynamique de la contamination au (Hg) et au (CN) dans le site

4. Discussion

4-1. Origine probable des fortes concentrations

Les concentrations très élevées en Al, Fe, Mn, V et Hg, sont certainement dues aux différentes activités liées à l'exploitation de l'or dans la zone. Les teneurs en Hg proviennent probablement de son utilisation pour l'amalgamation au cours de l'exploitation de l'or. Le fer est naturellement présent dans les roches du secteur

et sa forte concentration peut être justifiée par les phénomènes d'altération et d'érosion puis l'intense de l'activité minière qui est très élevée dans la zone. L'aluminium proviendrait éventuellement des minéraux argileux en suspension. Le manganèse pourrait provenir de l'altération des roches issues par l'exploitation minière dans la zone. Aucune recommandation très détaillée n'a été spécifiée par l'OMS [23] concernant aux seuils du vanadium.

Tableau 3 : Indice de pollution par les métaux lourds (IP)

Elément	Moyenne	IP	Norme (OMS)
	(mg/L)		
Al	4,4750	22,3750	0,2000
Fe	2,9560	9,8530	0,3000
Mn	0,0170	0,0425	0,4000
CN	0,0135	0,1930	0,0700
As	0,0175	1,7500	0,0100
Hg	0,1198	19,9580	0,0600
V	0,0763	7,6250	0,0100
Cd	0,0013	0,4167	0,0030

L'Al et le Hg sont les éléments ayant les indices de pollution très élevés parmi ces échantillons, mais n'atteignent pas la valeur seuil, après suit les éléments Fe, V, As, Cd, CN et Mn. Tous ces éléments ont les valeurs en dessous de la valeur critique de l'indice de pollution des métaux lourds prévus par l'OMS. Les eaux étudiées montrent une contamination élevée en Al, Hg, Fe et en V (**Tableau 3**). L'exploitation minière qui est en accrotre de manière exponentielle dans la localité, et le rejet des déchets miniers, des eaux usées dans des cours d'eau, l'utilisation des produits chimiques détruisent l'écosystème aquatique puis la qualité d'eau, tous ces facteurs sont à l'origine de plusieurs types de maladies dans la localité. En effet, les métaux constituent une menace significative pour la santé, aussi bien lorsque l'exposition a lieu dans un cadre professionnel que lorsqu'elle a lieu « à bas bruit » dans l'environnement [21].

4-2. Dynamique spatiale de la pollution par les métaux lourds

Les fortes concentrations de ces métaux lourds s'expliquent par le fait des intenses activités minières dans la localité, ce qui aboutit au déversement des produits chimiques comme le mercure dans des cours d'eau, des eaux usées, les déchets miniers, les morts terrains et bien d'autres qui modifient la qualité de l'eau, détruit la faune aquatique. Ces facteurs pourraient aussi à l'origine de plusieurs maladies dans la localité telles que le cancer de la peau et des poumons, des troubles nerveux, neurologiques et cardiovasculaires et des intoxications neurologiques. La minéralisation en filons-aurifères de quartz dont les fortes proportions en soufre (de 2.8 à 14.9 ‰) indiqueraient des sources multiples [13]. L'aluminium est principalement d'origine géologique (altération naturelle des roches, ruissellement sur les sols) et peut se rencontrer dans l'eau sous les trois formes correspondant notamment à des silico-aluminates, des hydroxydes, des formes libres ou complexes minérales ou organiques. L'aluminium pourrait aussi provenir de l'altération géochimique des roches sous climat tropical et des activités minières dans la zone, libérant les oxy-hydroxydes de fer et d'aluminium et de l'altération des argiles (kaolinites, illites) dans les conditions confinées et acides [22]. Le mercure serait alors en partie issu de la géologie du secteur bien que les concentrations élevées constatées soient directement liées à son utilisation pour l'amalgamation du minerai [22]. Toutefois, les travaux de Rakotondrabe [6] et le rapport du PRECASEM [4] n'identifient pas une pollution au mercure, cela pourrait être dû au fait que les échantillons montrant des concentrations élevées de Hg aient été prélevés près des zones d'exploitation et de lavage : cela montre une pollution localisée en Hg et en ces autres éléments. Les fortes teneurs d'éléments traces dans ses eaux de surface et souterraine étudiées dans un contexte minier sont

généralement dues aux activités d'exploitation. En effet, les substances rencontrées dans les eaux de surface et souterraine de la région sont issues de l'altération chimique du substratum minéralisé et de l'orpaillage, car les eaux de surface constituent leur principale voie de transport [23]. Le calcul de l'indice de pollution des métaux lourds de ces eaux étudiées vient préciser que l'origine de la pollution de ses eaux est basée sur les dégâts causés par l'exploitation minière dans l'arrondissement. Il en ressort que parmi les éléments analysés, Al, Fe, Mn, Hg, V et bien d'autres éléments sont à l'origine de ces impacts environnementaux, mais avec un prélèvement des échantillons plus nombreux, à très grande échelle et plus d'éléments à analyser, nous aurions des résultats très élevés à la norme prévue par l'OMS. Les travaux de Rakotondrabe [6] dans le même site présentaient déjà des résultats un peu similaires en ce qui concerne la l'indice de pollution des métaux lourds moyen. La **Figure 8** donne la dynamique spatiale des concentrations en éléments métallique (Al, Mn, Cd, CN, Mg, V, As, et Fe) dans les sites miniers en cours d'exploitation de la localité de Bétaré-Oya.

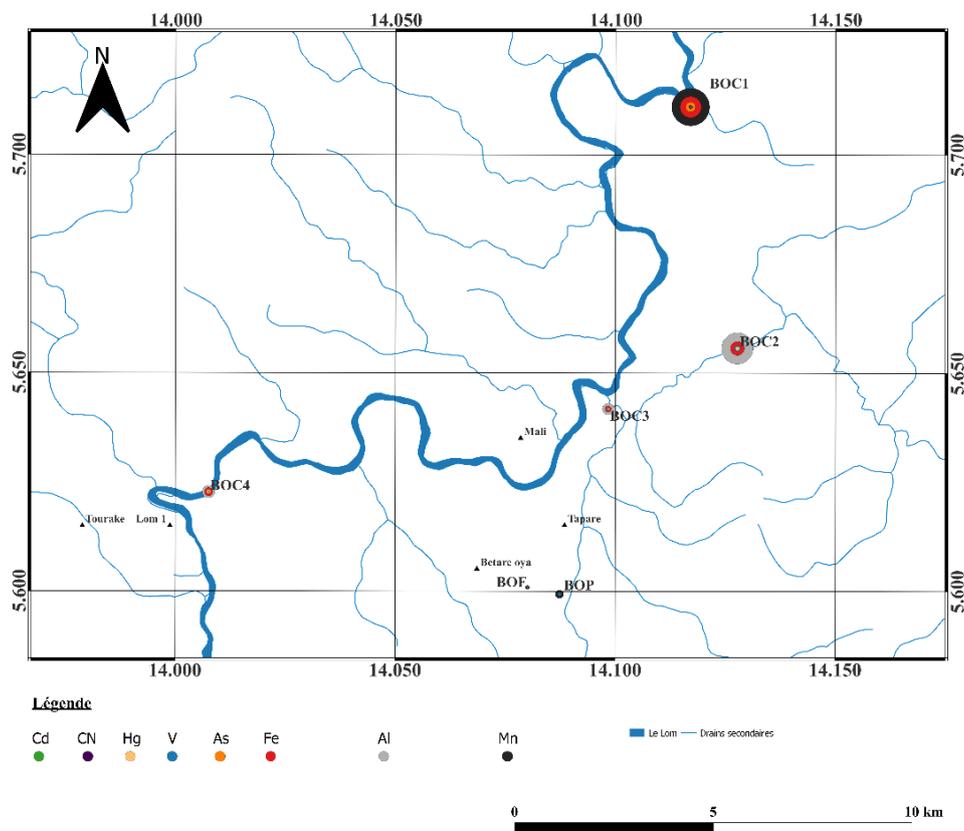


Figure 8 : *Dynamique spatiale de la contamination en éléments métalliques dans les sites miniers de la localité de Bétaré-oya*

5. Conclusion

En conclusion, cette étude visait à évaluer les impacts des activités d'exploitation minière sur les ressources en eaux dans la localité de Bétaré-Oya en se concentrant sur les zones de contamination accrue et en déterminant la qualité de l'eau pour la consommation humaine et la santé environnementale. En localisant et en échantillonnant divers points d'eau aussi bien superficielles que souterraine. Les résultats obtenus au cours de ce travail ont permis de caractériser la pollution des eaux de surface et souterraine par les métaux lourds, due à l'exploitation de l'or, qui sont à l'origine de multiples pollutions des eaux de nos jours. Concernant les paramètres physiques analysés, ces résultats montrent que les eaux étudiées sont acides à

légèrement acides ($5,4 < \text{pH} < 6,6$), faiblement minéralisées ou conductrices ($10 < \text{EC} < 80 \mu\text{S}/\text{cm}$), avec un taux d'oxygène faible ($15 < \% \text{ de saturation} < 84,44$). La turbidité est moyenne (59 à 520 NTU), les TDS sont faibles ($0 < \text{TDS} < 30 \text{ mg}/\text{l}$) et la température variant de 25 à 31 °C. La composition en métaux lourds des échantillons révèle des fortes concentrations en six éléments : Al (0,01 – 9,833 mg/l), Fe (0,03 – 20,8 mg/l), Mn (0,001 – 51,3 mg/l), Hg (0 - 0,034 mg/l), V (0,002 - 0,164 mg/l) et As (0,0002 – 0,5 mg/l). Les autres éléments (CN et Cd) ont des concentrations en dessous des directives de l'OMS 2017 pour l'eau potable. Les calculs de l'indice de pollution des métaux lourds (HPI) a permis de caractériser les eaux. Le HPI indique des valeurs élevées pour Al, Fe, Hg et V. Ce qui a permis de préciser la nature des éléments polluants les eaux étudiées. L'analyse de ces résultats a permis de conclure que les eaux superficielles et souterraines du secteur d'étude sont polluées en métaux lourds notamment en Al, Fe, Mn, Hg et V puis avec de l'As car avec plus de données nous pourrions avoir plus d'éléments polluants que ceux énumérés dans cette étude. La pollution constatée est en grande partie due aux activités d'exploitation minière dans la zone. Cette étude constitue une base de référence pour les recherches futures sur la qualité des ressources en eaux dans les sites miniers en cours d'exploitation de la localité de Bétaré-Oya. Les résultats soulignent l'importance d'une surveillance continue et de la mise en œuvre de pratiques minières durables pour protéger les ressources en eau. En outre, ces résultats peuvent être reliés à des questions régionales ou mondiales plus larges liées à l'extraction de l'or et à la contamination des ressources en eaux, soulignant ainsi la pertinence de cette étude dans un cadre plus large. En comprenant et en relevant ces défis, nous pouvons contribuer à une meilleure gestion de l'environnement et des ressources. La mise en commun des observations de cette étude avec des travaux antérieurs dans la zone porte à croire qu'il s'agit d'une pollution de longue durée localisée à l'environnement proche des sites miniers

Références

- [1] - S. D. KEESSTRA, V. GEISSEN, K. MOSSE, S. PIIRANEN, E. SCUDIERO, M. LEISTRA et V. L. SCHAIK, Soil as a filter for groundwater quality. *geoderma, Environmental Sustainability*, Vol. 4, issue 5, (November 2012) 507 - 516 p. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.10.007>
- [2] - A. K. CHAPAGAIN & S. ORR, An improved water footprint methodology linking global consumption to local water resources : a case of spanish tomatoes. *Journal of Environmental management*, 90, 1219 - 1228. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.06.006>
- [3] - A. O. TALABI & T. J. KAYODE, Groundwater pollution and remediation. *Journal of Water Resource and Protection*, 11, 1 - 19. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2019.111001>
- [4] - ANONYME, Réalisation d'une enquête sur l'utilisation du mercure dans le secteur de la mine artisanale et de la petite mine au Cameroun'. PRECASEM, (2019) 15 - 40 p.
- [5] - G. M. MBOUDOU, K. F. FOZAO, O. A. NJOH and C. M. AGYINGI, 'Characterization of Alluvial Gold Bearing Sediments of Betare Oya District-East Cameroon, Implication for Gold Exploration and Recovery', *Open Journal of Geology*, 7, 1724 - 1738 p. doi: 10.4236/ojg. (2017) 711115
- [6] - F. RAKOTONDRABE, J. R. NGOUPAYOU N., Z. MFONKA, E. H. RASOLOMANANA, A. J, ABOLO N., B. L. ASONE, A. A. AKO & M. H. RAKOTONDRABE, Assessment of Surface Water Quality of Bétaré-Oya Gold Mining Area (East-Cameroon). *J. Water Resour. Protec.*, 9 : 960 - 984
- [7] - M. E. MIMBA, T. OHBA, S. C. NGUEMHE FILS, M. J. WIRMVEM, N. NUMANAMI and F. T. AKA, Seasonal hydrological inputs of major ions and trace metal composition in streams draining the mineralized Lom Basin East Cameroon: Basis for Environmental Studies. *Earth Syst Environ.*, 1 (22) (2017) 1 - 9. <https://doi.org/10.1007/s41748-017-0026-6>

- [8] - M. TSALEFAC, R. NGOUFO, W. NKWAMBI, E. DJOUMESSI T., B. LENGUE F., Fréquences et quantités des précipitations journalières sur le territoire camerounais, *Publication de l'Association Internationale de Climatologie*, Vol. 15, (2003) 359 - 367
- [9] - M. TCHINDJANG, P. MBEVO F., U. HAMAN, E. VOUNDI, I. C. NJOMBISSIE & F. SAHA, Impact et cartographie de l'activité minière à petite échelle dans l'arrondissement de Bétaré-oya (Cameroun). Technical Report, (October 2017)
- [10] - V. NGAKO, P. AFFATON, J. M. NNANGE and TH. NJANKO, Pan-African tectonic evolution in central and southern Cameroon: tranpression and transtension during sinistral shear movements, *Journal of African Earth sciences*, 36 (2003) 207 - 214 p.
- [11] - S. F. TOTEU, J. PENAYE and Y. P. DJOMANI, Geodynamic evolution of the Pan-African belt in central Africa with special reference to Cameroon, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 41 (2004) 73 - 85 p.
- [12] - M. J. L. NDEMA, C. A. MBARINGONG, C. SIGUE, P. E. NGA, E. C. B. FANWI, T. L. ENOWAKWEN & J. F. NDONGFONG, Belt Bétaré-Oya gold district: implication for REE-bearing phases fracturation. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2988964/v1>
- [13] - A. VISHITI, C. E. SUH, B. LEHMAN, S. E. MUTUM, N. J. L. NGOME, N. J. NSHANJI, O. Y. MONGWE, F. E. CHINJO, A. J. EGBE and S. PETERSEN, 'Mineral chemistry, bulk rock geochemistry, and S- isotope signature of lode - gold mineralization in the Bétaré-Oya gold district, south-east Cameroon', (2018) 2579 - 2596 p. doi :10.1002/gj.3093
- [14] - S. V. MOHAN, P. NITHILA and S. J. REDDY, Estimation of heavy metals in drinking water and development of heavy metal pollution index. *J. Environ. Sci. Health*, 31A (1996) 283 - 289. ICA. No. M-3951
- [15] - B. PRASAD et J. M. BOSE, Evaluation of the heavy metal pollution index for surface and spring water near a limestone mining area of the lower Himalayas. *Environ Geol.*, 41 (2001) 183 - 188
- [16] - A. E. EDET et O. E. OFFIONG, Evaluation of water quality pollution indices for heavy metal contamination monitoring. A study case from Akpabuyo—Odukpani area, Lower Cross Rive Basin (Southeastern Nigeria). *Geojournal*, 57 (2003) 295 - 304
- [17] - H. T. A. EL-HAMID et T. A. HEGAZY, Evaluation of Water Quality Pollution Indices for Groundwater Resources of New Damietta, Egypt. *MOJ Eco Environ Sci.*, 2 (2017) 1 - 5. Doi: 10.15406/mojes.2017.02.00045
- [18] - S. GIRI et A. K. SINGH, Assessment of metal pollution in groundwater using a novel multivariate metal pollution index in the mining areas of the Singhbhum copper belt. *Environmental Earth Sciences*, 78 (2019) 1 - 11. Doi :10.1007/s12665-019-8200-9
- [19] - P. J. O. DJADE, A. TRAORE, K. J. T. KOFFI, K. N. KEUMEAN, G. SORO et N. SORO, Evaluation du niveau de contamination des eaux souterraines par les éléments traces métalliques dans le département de Zouan-Hounien (Ouest de la Côte d'Ivoire). *Journal of Applied Biosciences*, 150 (2020) 15457 - 15468. <https://doi.org/10.35759/JABs.150.6>
- [20] - ANONYME, Guidelines for Drinking-water Quality. 4th Ed. incorporating the 1st Addendum, OMS (Organisation Mondiale de la Santé), (2017) 631 p.
- [21] - H. HU, R. SHIH, S. ROTHENBERG et B. S. SCHWARTZ, The epidemiology of lead toxicity in adults : measuring dose and consideration of other methodologic issues - *Environmental health perspectives*, (2007)
- [22] - L. NOËL, J. C. LEBLANC et T. GUERIN, Determination of several elements in duplicate meals from catering establishments using closed vessel microwave digestion with inductively coupled plasma mass spectrometry detection : estimation of daily dietary intake. *Food Additives and Contaminants*, 20 (1) (2003) 44 - 56
- [23] - E. M. MUMBFU, T. OHBA, S. C. NGUEMHE FILS, J. MENGNJO, N. NUMANAMI et F. TONGWA, 'Seasonal Hydrological Inputs of Major Ions and Trace Metal Composition in Streams Draining the Mineralized Lom Basin, East Cameroon : Basis for Environmental Studies', (2017) 1 - 9. doi: 10.1007/s41748-017-0026-6