

Suivi de 2016 à 2018 de quelques paramètres physico-chimiques et métaux traces dans les stations d'eau brute de la SODECI des districts des Savanes et du Denguélé au Nord de la Côte d'Ivoire

**Franck Maxime GNAMBA^{1*}, Derving BAKA², Seyhi BRAHIMA¹, Yao Yann Anicet BROU¹
et Yeï Marie Solange OGA²**

¹ *Université Peleforo Gon Coulibaly de Korhogo, UFR des Sciences Biologiques, Département de Géosciences, BP 1328 Korhogo, Côte d'Ivoire*

² *Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody-Abidjan, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM), Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE), 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire*

* Correspondance, courriel : fmgnamba@gmail.com

Résumé

L'objectif de ce travail est d'analyser et suivre l'évolution de 2016 à 2018 de quelques paramètres physico-chimiques et métaux traces, dans les stations de production d'eau potable de la SODECI, dans les districts des Savanes et du Denguélé. Pour ce faire, des résultats d'analyse physico-chimique des métaux et autres paramètres ont été utilisés. La plupart des paramètres ont été dosés par spectromètres d'absorption atomique, à l'exception du mercure dosé par digestion et dosage par spectromètre d'absorption atomique à hydrure. La démarche méthodologique est basée sur une analyse statistique et comparative des doses des éléments dans les eaux avec les normes OMS (2017) pour apprécier la qualité des eaux. En outre, le calcul de l'index de géoaccumulation renseigne sur l'intensité de la pollution métallique. Enfin, l'utilisation de la classification ascendante hiérarchique (CAH) nous a permis de déterminer l'origine des métaux dans les eaux. Les résultats confirment que les métaux analysés ont des concentrations qui ne présentent pas de risque de toxicité pour les consommateurs. Le calcul de l'index de géoaccumulation révèle une seule classe à savoir, sans à légère contamination en ETM ($0 > I_{geo} > 1$). Le suivi des composées étudiés de 2016 à 2018 indique qu'ils ne varient quasiment pas dans les eaux, à l'exception des matières en suspension (MES), la demande chimique en oxygène (DCO) et la demande biologique en oxygène (DBO₅) qui évoluent. La CAH indique que les MES jouent un rôle important en tant que vecteurs des métaux dans les eaux.

Mots-clés : *suivi, métaux traces, index de géoaccumulation, station d'eau brute, districts des savanes et Denguélé.*

Abstract

Monitoring from 2016 to 2018 of some physico-chemical parameters and trace metals in SODECI raw water station from Savannah and Denguélé district in the North part of Côte d'Ivoire

The objective of this study is to analyze and follow the evolution from 2016 to 2018 of some physico-chemical parameters and trace metals in drinking water production stations of SODECI in Savannah and Denguélé districts. For this purpose, results of physico-chemical analysis of trace metals and other parameters were

used. Most of the parameters were determined by atomic absorption spectrometer, excepted mercury determined by digestion and hydride atomic absorption spectrometer. The methodological approach is based on statistical and comparative analysis of the doses of elements in water with WHO standards 2017 to assess water quality. In addition, the calculation of geoaccumulation index provide information on the level of metallic pollution. Finally, we use cluster analysis to determine the sources of metals in water. The results confirmed that the metals analyzed are present with concentrations which do not provided a risk of toxicity for consumers. Moreover, the calculation of the geoaccumulation index indicate a single class, namely, without slight contamination in ETM ($0 > I_{geo} > 1$). The monitoring of the parameters studied from 2016 to 2018 indicates that they do not vary substantially in waters, except suspended matters (MES), chemical oxygen demand (DCO) and biological oxygen demand (DBO₅) which increase significantly. Cluster analysis indicates that MES play an important role as carriers of metals in water.

Keywords : *monitoring, trace metals, geoaccumulation index, raw water station, savannah and Denguélé districts.*

1. Introduction

L'eau souillée est l'un des vecteurs majeurs des maladies qui font le plus de morts sur la planète [1]. L'altération de l'environnement naturel, notamment le milieu des ressources en eau, est devenu progressivement une préoccupation mondiale [2]. En outre, le développement de nos sociétés industrielles est très lié à la découverte et à l'utilisation de métaux. Ainsi, la consommation de métaux a augmenté de 300 % dans les cinquante dernières années et les relargages anthropogéniques d'éléments métalliques tels que le plomb (Pb), le mercure (Hg), le zinc (Zn), le cadmium (Cd), le cuivre (Cu) et le chrome (Cr) ont été multipliés par trois, depuis le début de l'ère industrielle [3]. Dans de nombreuses régions du monde, la contamination en métaux est devenue un problème de santé publique [4]. Les métaux sont omniprésents dans les eaux de surface ou souterraines avec cependant des concentrations en général très faibles, ce qui explique leur dénomination de « métaux traces » ou « éléments traces métalliques » (ETM). Ces faibles concentrations en métaux lourds constituent le fond géochimique d'un milieu [5]. La seule présence d'un métal lourd dans l'environnement n'est pas suffisante pour évaluer son impact. Cet impact est potentiel si le métal donné se trouve à des niveaux des concentrations anormalement élevées par rapport au fond géochimique [6]. Des facteurs anthropiques comme l'activité minière peuvent générer une augmentation considérable des concentrations en métaux dans les eaux et les sédiments, on parle alors d'éléments majeurs (métaux lourds) dans le milieu étudié [7]. Dans la Directive Européenne sur l'Eau 2000/60/CE, trois métaux (Cd, Pb, Hg) ont été identifiés comme des "substances dangereuses prioritaires", ces substances sont soumises à un objectif de rejet zéro dans les eaux. De plus, une liste de 9 éléments traces à risques pour la santé humaine a été proposée dans le rapport 42 de l'Académie des Sciences (1998). Ces éléments sont Cd, Pb, Hg, As, Ni, Cr, Cu, Zn, et Se [6]. Parmi les sources anthropiques de métaux lourds, nous pouvons signaler : l'activité minière, l'industrie métallurgique et sidérurgique, les engrais et pesticides appliqués dans la culture des sols, les incinérateurs et cendres d'incinération des déchets, les déchets médicaux, les déchetteries de villes, les émissions des usines et moteur à explosion, les effluents des égouts et boues d'épuration [8 - 10]. La croissance démographique que connaît la Côte d'Ivoire après son indépendance, a eu pour conséquence, l'augmentation des besoins primaires des populations dont l'accès à l'eau potable. Cet accroissement rapide de la population [11], se traduit donc par une forte pression sur les ressources naturelles et en eau, mais également par la production de plus en plus importante de déchets et rejets de toute nature, source de pollution. Les districts des Savanes et du Denguélé ne sont pas en marge de ces problèmes environnementaux. En effet, ces deux régions sont pionnières de la culture intensive du binôme coton-anacarde [12]. De plus, toute la zone Nord est devenue depuis quelques années le berceau de nombreux orpailleurs clandestins venus

d'ici et de la sous-région qui exploitent de façon artisanale les minerais, notamment l'or et le diamant. Ce qui expose les ressources en eau à différentes pollutions métalliques résultant des activités minières et pratiques agricoles (engrais de synthèse, pesticides et autres). Généralement, ces polluants métalliques se retrouvent dans les eaux de ruissellement qui contaminent à leur tour les eaux de surface et les nappes phréatiques, pour terminer dans la chaîne alimentaire avec toutes les conséquences néfastes que cela représente pour notre santé [4, 13, 14]. Or dans ces régions, l'alimentation en eau potable se fait prioritairement au moyen de retenues de surface et à notre connaissance, aucune étude sur l'évolution des métaux dans les eaux n'a été effectuée pour diagnostiquer la qualité des ressources. Pourtant, un suivi rigoureux dans le temps de ces ressources en eau vulnérables à toute forme de pollution s'impose pour la sauvegarde de leur qualité, ceci en accord avec les directives OMS de qualité pour l'eau de boisson. L'objectif notre travail est donc d'analyser et suivre l'évolution de 2016 à 2018 de quelques métaux traces et autres paramètres dans les stations de production d'eau potable de la SODECI au Nord de la Côte d'Ivoire et en évaluer la qualité. En effet, La surveillance de la qualité de l'eau de boisson peut être définie comme « l'évaluation et l'examen permanent et vigilant sous l'angle de la sécurité sanitaire et de l'acceptabilité de l'eau de boisson [15].

2. Matériel et méthodes

2-1. Cadre géographique de la zone d'étude

La zone d'étude est à cheval entre deux districts à savoir, le district des Savanes et le district du Denguélé (*Figure 1*). Le district des savanes a été découpé depuis 2011 en trois régions (Poro, Bagoué et Tchologo) et dix départements (Korhogo, M'bengué, Sinématiali, Dikodougou, Ferkessédougou, Kong, Ouangolodougou, Boundiali, Kouto et Tengrela). Il se situe entre les latitudes $8^{\circ} 30'$ et $10^{\circ} 30'$ Nord et les longitudes 4° et 7° Ouest et est drainée par les nombreux affluents du fleuve Bandama [16]. Le district a une superficie de $40\,323\text{ km}^2$ et une population estimée à 1.607.497 habitants en 2014, son chef-lieu est la ville de Korhogo. Le Denguélé est un district qui a pour chef-lieu, la ville d'Odienné. Il se situe entre $9^{\circ} 30'$ de latitude Nord et $7^{\circ} 25'$ de longitude Ouest. Ce district est situé au nord-ouest du pays et entouré par les districts des Savanes et de Woroba. Il a une superficie de $20\,600\text{ km}^2$ et une population estimée en 2014 à 289.779 habitants. Il est divisé entre les régions du Folon (Minignan et Kaniasso) et de Kabadougou (Samatiguila, Odienné et Madinani). Au plan climatique, la zone d'étude est dominé par un régime climatique de type soudanais ou régime tropical de transition. Les amplitudes thermiques sont relativement importantes (de l'ordre de 20°C), l'humidité est inférieure à celle du sud du pays (de 40 à 50 %). Les précipitations annuelles sont en moyenne de 1 203 mm à Korhogo et 1 491 mm à Odienné [16].

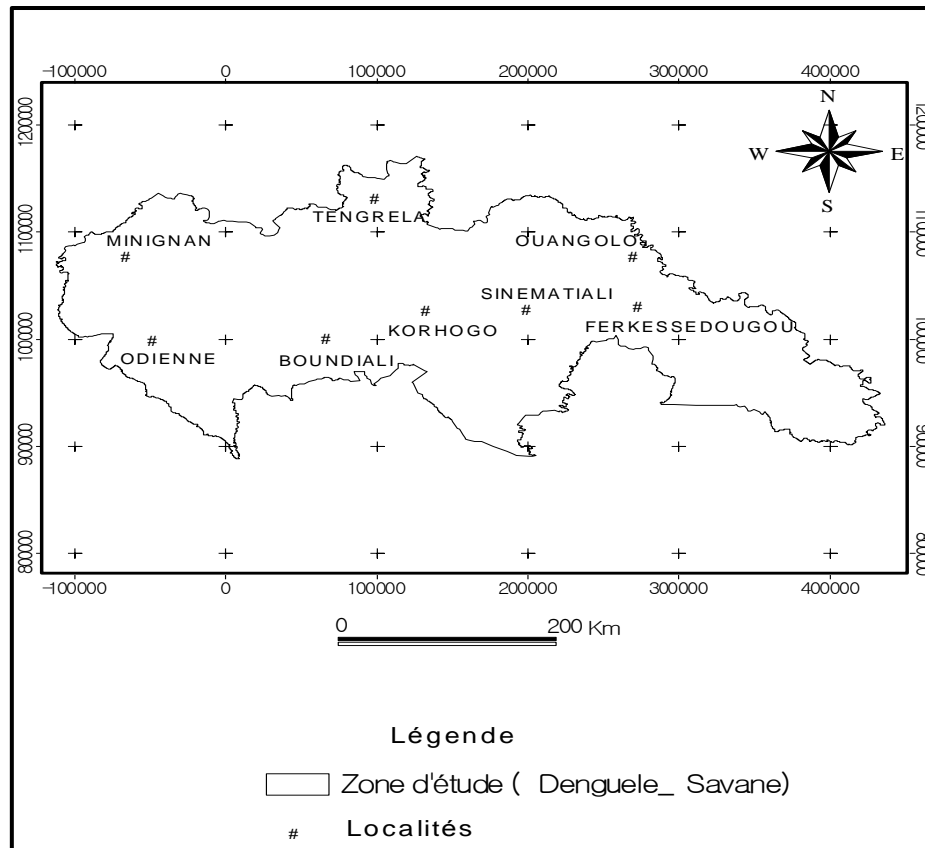


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

2-2. Matériel

Les données utilisées dans le cadre de cette étude sont essentiellement des résultats d'analyses d'échantillons d'eau de 2016 et 2018 prélevés dans les stations d'eau brute servant à l'approvisionnement en eau potable. Les prélèvements ont été effectués au cours des différentes années dans les mois de juin et septembre, ce qui correspond à la période pluvieuse. Les échantillons d'eau ont été analysés par le laboratoire d'ENVAL spécialisé dans les analyses d'eau, de métaux lourds et des pesticides. Les éléments analysés dans cette étude portent essentiellement sur les paramètres suivants :

- paramètres physico-chimiques :

Matières En Suspension (MES), Demande Chimique en Oxygène (DCO), Demande Biochimique en Oxygène sur cinq jours (DBO₅).

- métaux traces (ETM) :

Plomb (Pb), Cadmium (Cd), Arsenic (As), Chrome (Cr), Sélénium (Se), Mercure (Hg), Cyanure (CN), Baryum (Ba), Bore (B).

2-3. Méthodes

2-3-1. Méthode d'analyse

Les échantillons prélevés selon la norme ISO 5667-1 et ont été conditionnés dans des flacons en verre de 1000 mL et polyéthylène de 205 mL. Les échantillons ont été stockés au réfrigérateur à $3^{\circ}\text{C} \pm 2$ avant leur analyse au laboratoire. La plupart des micropolluants ont été dosés par spectromètres d'absorption atomique (Varian AA280Z). Le mercure a été dosé au laboratoire par digestion et dosage par spectromètre d'absorption atomique à hydruure (Varian AA220). La détermination des MES est obtenue par différence de poids entre le poids du filtre avant et après la filtration. Pour la dernière mesure, le filtre doit être sec.

2-3-2. Qualité des eaux et index de géoaccumulation des ETM

La qualité d'une eau est un paramètre déterminant pour qu'elle puisse être utilisée à des fins d'alimentation en eau potable car certains métaux sont réputés toxique et dangereux pour la santé (**Figure 2 et Tableau 1**). L'évaluation de la qualité chimique de l'eau de boisson est fondée sur la comparaison entre les résultats de l'analyse qualitative de l'eau et des valeurs guides. Ainsi, pour étudier la qualité des eaux, nous avons examiné les concentrations des éléments étudiés à la lumière des valeurs guides de qualité OMS [17]. Ce qui nous a permis de faire ressortir la conformité ou non vis à vis des paramètres étudiés des eaux brutes des différentes stations. Ces valeurs guides fixent des limites ou seuil de concentrations de la présence des éléments indiqués dans les eaux de boisson (**Tableau 2**). Nous avons utilisé un autre critère de qualité pour évaluer l'intensité de la contamination en éléments traces métalliques, c'est l'index de géoaccumulation [18]. Cet index de caractère empirique compare une concentration donnée versus une valeur considérée comme fond géochimique. Par ailleurs, une échelle avec six classes d'index de géoaccumulation a été définie (**Tableau 3**). L'index est donné par la **Formule** suivante :

$$I_{geo} = \log_2 (C_n) / 1.5 (B_n) \tag{1}$$

où, I_{geo} : Index de géoaccumulation ; \log_2 : logarithme de base 2 ; C_n : concentration mesurée dans l'échantillon ; B_n : fond géochimique ; 1.5 : facteur d'exagération du fond géochimique, dont la fonction est de prendre en compte les fluctuations naturelles du fond géochimique.

Le fond géochimique ou bruit de fond comme indiqué plus haut, constitue la concentration naturelle à des faibles teneurs des éléments traces métalliques ou métaux lourds dans l'environnement (les sols, roches, sédiments, eaux). Cet index permet d'évaluer l'ampleur des apports anthropogènes des métaux lourds dans l'environnement.



Figure 2 : Lésions de la peau dues à l'empoisonnement à l'arsenic (source, [19])

Tableau 1 : Principaux effets associés à quelques métaux traces (source, [20])

Eléments	Effets
As	Toxique, possible cancérigène
Cd	Hypertension, dommage sur foie
Cr	Cancérigène sous forme de Cr(VI)
Cu	Peu toxique envers les animaux, toxique envers les plantes et les algues à des niveaux modérés
Hg	Toxicité chronique et aiguë
Ni	Allergies de peau, maladies respiratoires, possible cancérigène
Pb	Toxique
Se	Essentiel à faibles doses Toxique à doses élevées
Zn	Toxique pour les végétaux A de fortes teneurs

Tableau 2 : Valeurs limites des concentrations des paramètres d'étude dans les eaux

Paramètres	Valeurs Guides OMS 2017
Pb ($\mu\text{g/L}$)	10
Cd ($\mu\text{g/L}$)	3
As ($\mu\text{g/L}$)	10
Cr ($\mu\text{g/L}$)	50
Se ($\mu\text{g/L}$)	40
Hg ($\mu\text{g/L}$)	6
CN ($\mu\text{g/L}$)	50
MES (mg/L)	-
Ba (mg/L)	1,3
B (mg/L)	2,4
DCO (mg/L)	-
DBO ₅ (mg/L)	-

Le tiret (-) indique qu'il n'y pas de valeur guide

Tableau 3 : Classes définies par l'index de géoaccumulation [21]

Valeur de l'index (I_{geo})	Classes I_{geo}	Intensité de la pollution
$I_{geo} > 5$	6	Contamination extrême
$4 > I_{geo} > 5$	5	Forte à extrême contamination
$3 > I_{geo} > 4$	4	Forte contamination
$2 > I_{geo} > 3$	3	Contamination modérée à forte
$1 > I_{geo} > 2$	2	Contamination modérée
$0 > I_{geo} > 1$	1	Sans à légère contamination
$I_{geo} < 0$	0	Sans contamination

2-3-3. Détermination de la source des éléments dans les eaux

La source probable des métaux a été étudiée à partir la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH). Elle demeure l'une des méthodes de regroupement de données la plus largement appliqué en sciences de la terre [22]. Dans cette étude, la distance euclidienne a été employée comme une mesure de similarité/dissimilarité, tandis que la méthode d'agrégation de Ward a été employée pour lier les faisceaux. Le fondement mathématique de la méthode tel que proposé par [23] est basé sur le calcul de la distance euclidienne entre les individus ou observations dans un espace à n-dimensions. Les données doivent être normalisées par le calcul de leurs moyennes à l'aide de la formule de **l'Équation (2)**:

$$K_{ij} = \frac{(X_{ij}-X)}{S_{ic}} \tag{2}$$

où, K_{ij} est la valeur normale de X_{ij} pour la $i^{ième}$ variable du $j^{ième}$ individu, X est la moyenne de la $i^{ième}$ variable et S_{ic} l'écart type.

La procédure adoptée donne un poids égal à chaque variable. Ainsi, la mesure de similarité est tout simplement la distance définie dans un espace euclidien [23]. La distance entre deux individus (j, k) est donnée par l'Équation (3):

$$d_{ij} = [\sum_{i=1}^N (K_{ij} - K_{ik})] \tag{3}$$

où, K_{ik} représente la $K^{ième}$ variable mesurée sur l'objet i , et K_{jk} la $K^{ième}$ variable mesurée sur l'objet j . Le résultat est donné sous forme d'un dendrogramme horizontal ou vertical qui classe les observations ou variables par groupes ou sous-groupes ayant le même poids ou les mêmes caractéristiques.

3. Résultats

3-1. Analyse statistique des teneurs des éléments dans les différentes stations

Nous avons effectué une analyse des paramètres étudiés au cours des années 2016 et 2018 et les résultats statistiques sont consignés dans le **Tableau 4**. L'analyse statistique des données au cours de l'année 2016 révèle que les valeurs de la plupart paramètres ne varient pas dans les différentes stations, en témoigne les valeurs nulles d'écart-type. Exception faite, aux valeurs de Cr, Hg, CN qui varient sensiblement, et à la matière en suspension (MES) qui présente la dispersion la plus importante des valeurs dans les différentes stations. Les valeurs de MES sont comprises entre 4,3 mg/L et 101 mg/L avec une moyenne de 44,04 mg/L, l'écart-type est de 29,84 mg/L. La plus forte valeur est enregistrée à la station de Korhogo et la plus faible à Tengrela. Le chrome (Cr) a des concentrations qui oscillent entre 5 µg/L et 12 µg/L avec une moyenne de 6,58 µg/L et un écart-type de 2,88 µg/L. Les concentrations en mercure (Hg) varient suivant une faible plage de 0,10 µg/L (Valeur minimale) à 0,18 µg/L (valeur maximale). La valeur minimale est obtenue à Ferké et le maximum à Sinématiali. Le cyanure (CN) dans les différents points d'eau étudiés à une concentration comprise entre 3 µg/L et 16 µg/L, avec une moyenne de 8 et un écart-type de 4,60 µg/L. La plus forte valeur de cyanure est obtenue dans la ville de Ferké. Les valeurs de DCO et DBO₅ sont réparties de façon invariable dans les eaux brutes étudiées et la DCO vaut 5 fois la valeur de la DBO₅ (**Tableau 4**). Au cours de l'année 2018, la DCO et la DBO₅ connaissent une variation relativement importante de leurs concentrations dans les différentes stations. Ce qui témoigne d'une augmentation de la charge de matière organique biodégradable ou non dans les eaux des stations. La DCO enregistre une teneur qui oscille entre 30 mg/L et 98,7 mg/L, la valeur maximale est obtenue dans le secteur de Minignan. La moyenne et l'écart-type sont respectivement de 55,30 mg/L et de 31,66 mg/L. La DBO₅ a des concentrations variant de 10 à 40 mg/L avec un écart-type de 11,49 mg/L. Les valeurs de DBO₅ obtenues se rapportent à celles des stations d'épuration efficace (20 < DBO₅ < 40). En outre, il faut également souligner une variation des valeurs de MES. Les mesures enregistrées sont très dispersées et comprises entre 5 mg/L et 209 mg/L, la valeur maximale est obtenue à Ferké, la moyenne est de 57 ± 75,65 mg/L. Par contre, Le mercure (Hg) qui présentait une légère variation dans les stations va enregistrer une stabilisation et le sélénium (Se) qui ne variait pas au cours de l'année 2016 va connaître une légère variation dans les eaux. Les valeurs enregistrées varient de 5 µg/L (représentant la valeur minimale) à 10 µg/L (la valeur maximale). On observe paradoxalement aussi une baisse relative des doses de Cr et CN en 2018 par rapport à l'année 2016. Les valeurs extrêmes enregistrées au cours de cette année sur l'ensemble des stations sont respectivement de 5 à 7,63 µg/L pour le Cr et de 2 à 13 µg/L pour le CN. En dehors des changements relevés sur les composés indiqués, tous les autres paramètres enregistrent la même tendance au cours de l'année 2018 dans les différentes stations (**Tableau 4**).

3-2. Évolution des paramètres de 2016 à 2018

Les graphes d'évolution des teneurs des paramètres étudiés de 2016 à 2018 sont représentés par les **Figure 3 et Figure 4**. L'analyse des différents graphiques vient confirmer les observations faites dans la section précédente. Elle indique que la majorité des paramètres sont repartis avec des concentrations relativement uniformes dans les différentes stations, à l'exception de quelques éléments (MES, DCO, DBO₅). En effet, on constate sur les figures une nette évolution de 2016 à 2018 des teneurs dans les eaux des composés tels les MES et dans une moindre mesure de la DCO et la DBO₅. Cette augmentation des concentrations est relativement significative dans certaines stations comme Boundiali, Odienné et Minignan pour la DCO, Ferké et Ouangolo pour les MES avec des valeurs au double ou au triple. Cette augmentation a pour conséquence d'augmenter la turbidité des eaux et peut poser des problèmes d'efficacité dans le traitement des eaux. Les autres paramètres, c'est-à-dire les métaux réputés toxiques (Pb, le Cd, le Cr, le Hg, le Se, le CN, le Ba, le B et l'As) sont présents à des proportions qui ne varient quasiment pas ou sensiblement tout au long des deux années d'observation (2016 - 2018).

Tableau 4 : Statistique des éléments étudiés dans les stations d'eau en 2016 et 2018

Année	Paramètres	Stations	Moyenne	Minimum	Maximum	Ecart-type
2016	Pb (µg/L)	8	5,00	5,00	5,00	0
	Cd (µg/L)	8	0,50	0,50	0,50	0
	As (µg/L)	8	5,00	5,00	5,00	0
	Cr (µg/L)	8	6,58	5,00	12,00	2,88
	Se (µg/L)	8	10,00	10,00	10,00	0
	Hg (µg/L)	8	0,11	0,10	0,18	0,03
	CN (µg/L)	8	8,00	3,00	16,00	4,60
	MES (mg/L)	8	44,04	4,30	101,00	29,84
	Ba (mg/L)	8	0,50	0,50	0,50	0
	B (mg/L)	8	0,50	0,50	0,50	0
	DCO (mg/L)	8	30,00	30,00	30,00	0
	DBO ₅ (mg/L)	8	5,00	5,00	5,00	0
2018	Pb (µg/L)	8	5,00	5,00	5,00	0
	Cd (µg/L)	8	0,50	0,50	0,50	0
	As (µg/L)	8	5,00	5,00	5,00	0
	Cr (µg/L)	8	5,33	5,00	7,63	0,93
	Se (µg/L)	8	9,38	5,00	10,00	1,77
	Hg (µg/L)	8	0,10	0,10	0,10	0
	CN (µg/L)	8	5,00	2,00	13,00	3,96
	MES (mg/L)	8	57,00	5,00	209,00	75,65
	Ba (mg/L)	8	0,50	0,50	0,50	0
	B (mg/L)	8	0,50	0,50	0,50	0
	DCO (mg/L)	8	55,30	30,00	98,70	31,66
	DBO ₅ (mg/L)	8	27,88	10,00	40,00	11,49

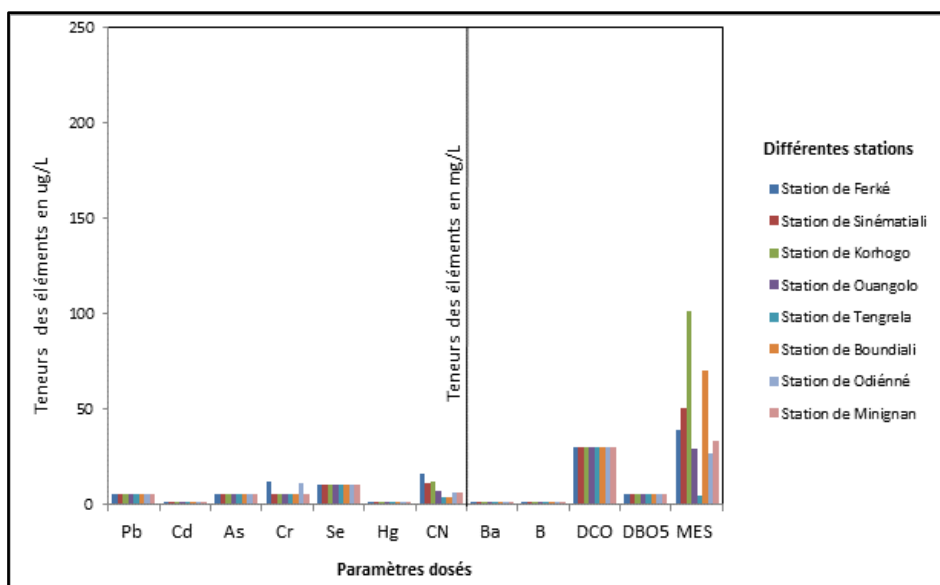


Figure 3 : Distribution des teneurs des paramètres dans les différentes stations en 2016

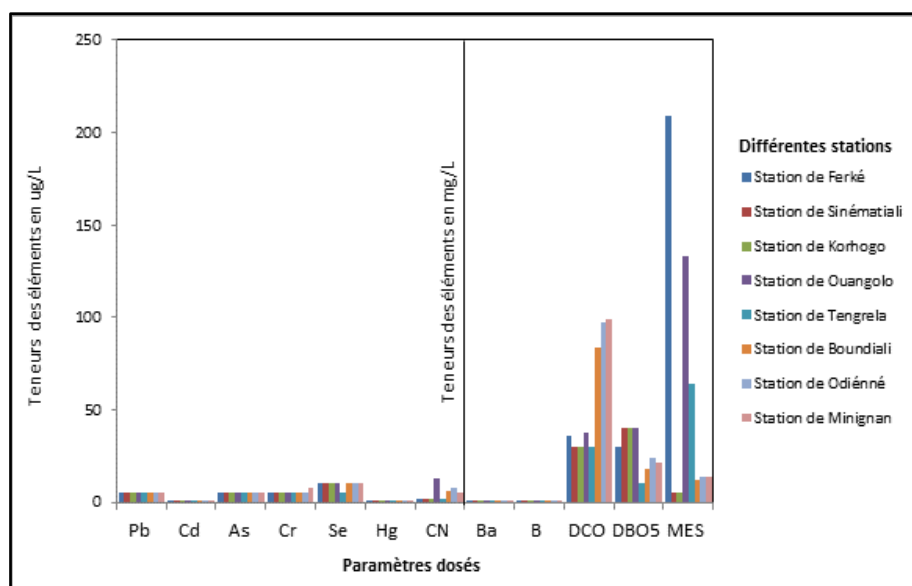


Figure 4 : Distribution des teneurs des paramètres dans les différentes stations en 2018

3-3. Qualité des eaux et intensité de la contamination en ETM

L'étude de la conformité des eaux brutes des huit stations vis-à-vis des paramètres étudiés durant les années 2014 à 2018 indique tous les éléments étudiés (en dehors de la DBO, la DCO et les MES n'ayant de valeurs guides), sont présents dans les eaux à des proportions inférieures aux valeurs directives OMS 2017. Par conséquent, les composés analysés dans les eaux brutes des différentes stations de la SODECL ne présentent pas de risques majeurs de contamination ou pour la santé des consommateurs. Ce constat est corroboré par le calcul de l'index de géoaccumulation de certains métaux traces dans les eaux considérés comme des substances dangereuses prioritaires (Pd, Cr et Cd, Hg). En effet, les résultats du calcul de l'index obtenus révèlent que ces métaux se regroupent dans une seule classe de Müller dans toutes la station d'eau brute quelque soit l'année. Il s'agit, de la classe 1 qui correspond à la catégorie, sans à légère contamination en ETM. En effet, toutes les valeurs des index sont très faibles et comprises entre 0 et 1 ($0 > I_{geo} > 1$) (Tableau 5). En outre, l'analyse

du tableau indique que les valeurs de l'index du cadmium sont identiques et relativement plus élevées que celles des autres métaux. Les valeurs de l'index du Cr sont quasiment identiques dans toutes les stations à l'exception de Ferké et Odiénné au cours de l'année 2016, et Minignan sur les deux années d'observations. Les valeurs de du Hg sont constantes à l'exception des stations de Sinématiali, Boundiali et Odiénné en 2016.

Tableau 5 : Valeurs d'index de géoaccumulation dans les différentes stations durant les années 2016 et 2018

Année	Stations	$I_{geo}(Cd)$	$I_{geo}(Cr)$	$I_{geo}(Pb)$	$I_{geo}(Hg)$
2016	Ferké	$2,5086.10^{-4}$	$4,6853.10^{-5}$	$7,91039.10^{-5}$	$6,69.10^{-5}$
	Sinématiali	$2,5086.10^{-4}$	$1,9522.10^{-5}$	$7,91039.10^{-5}$	$1,22.10^{-4}$
	Korhogo	$2,5086.10^{-4}$	$1,9522.10^{-5}$	$7,91039.10^{-5}$	$6,69.10^{-5}$
	Ouangolo	$2,5086.10^{-4}$	$1,9522.10^{-5}$	$7,91039.10^{-5}$	$6,69.10^{-5}$
	Tengrela	$2,5086.10^{-4}$	$1,9522.10^{-5}$	$7,91039.10^{-5}$	$6,69.10^{-5}$
	Boundiali	$2,5086.10^{-4}$	$1,9522.10^{-5}$	$7,91039.10^{-5}$	$7,29.10^{-5}$
	Odiénné	$2,5086.10^{-4}$	$4,0606.10^{-5}$	$7,91039.10^{-5}$	$7,56.10^{-5}$
	Minignan	$2,5086.10^{-4}$	$2,0459.10^{-5}$	$7,91039.10^{-5}$	$6,69.10^{-5}$
2018	Ferké	$2,5086.10^{-4}$	$1,9522.10^{-5}$	$7,91039.10^{-5}$	$6,69.10^{-5}$
	Sinématiali	$2,5086.10^{-4}$	$1,9522.10^{-5}$	$7,91039.10^{-5}$	$6,69.10^{-5}$
	Korhogo	$2,5086.10^{-4}$	$1,9522.10^{-5}$	$7,91039.10^{-5}$	$6,69.10^{-5}$
	Ouangolo	$2,5086.10^{-4}$	$1,9522.10^{-5}$	$7,91039.10^{-5}$	$6,69.10^{-5}$
	Tengrela	$2,5086.10^{-4}$	$1,9522.10^{-5}$	$7,91039.10^{-5}$	$6,69.10^{-5}$
	Boundiali	$2,5086.10^{-4}$	$1,9522.10^{-5}$	$7,91039.10^{-5}$	$6,69.10^{-5}$
	Odiénné	$2,5086.10^{-4}$	$1,9522.10^{-5}$	$7,91039.10^{-5}$	$6,69.10^{-5}$
	Minignan	$2,5086.10^{-4}$	$2,9791.10^{-5}$	$7,91039.10^{-5}$	$6,69.10^{-5}$

3-4. Origine des éléments dissous dans les eaux

Les résultats de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) (*Figure 5 et Figure 6*) permettent de faire quelques déductions sur l'origine des micropolluants et autres paramètres étudiés dans les stations de production d'eau potable de la zone d'étude. La distance euclidienne utilisée comme méthode pour lier les faisceaux et comme mesure de similitude a permis de regrouper statistiquement les variables ayant relativement une origine commune. Trois grandes classes statistique se dégagent de l'analyse des différents dendrogrammes, il s'agit de :

- Se, Cr, As, Pb et CN qui ont une source commune dans les eaux ;
- Hg, B et le Ba résultent également d'un apport ou source commune dans les eaux;
- DCO et les MES sont liés indiquant que la demande chimique en oxygène augmente significativement avec l'apport des matières en suspension. Ce résultat indique que la quantité d'oxygène consommée par l'oxydation des matières organiques et minérales présentes dans l'eau évolue ou est étroitement liée à l'augmentation des colloïdes minéraux ou organiques.

Une analyse plus poussée des dendrogrammes indique que les faisceaux comprenant (Se, Cr, As, Pb et CN) et (Hg, B, Ba, Cd et DBO5) sont liés à celui de MES et DCO. Ce résultat pourrait indiquer que l'origine des métaux lourds est associée aux particules en suspension et donc à la matière organique et minérale dissoute ou sous forme de particules dans les eaux.

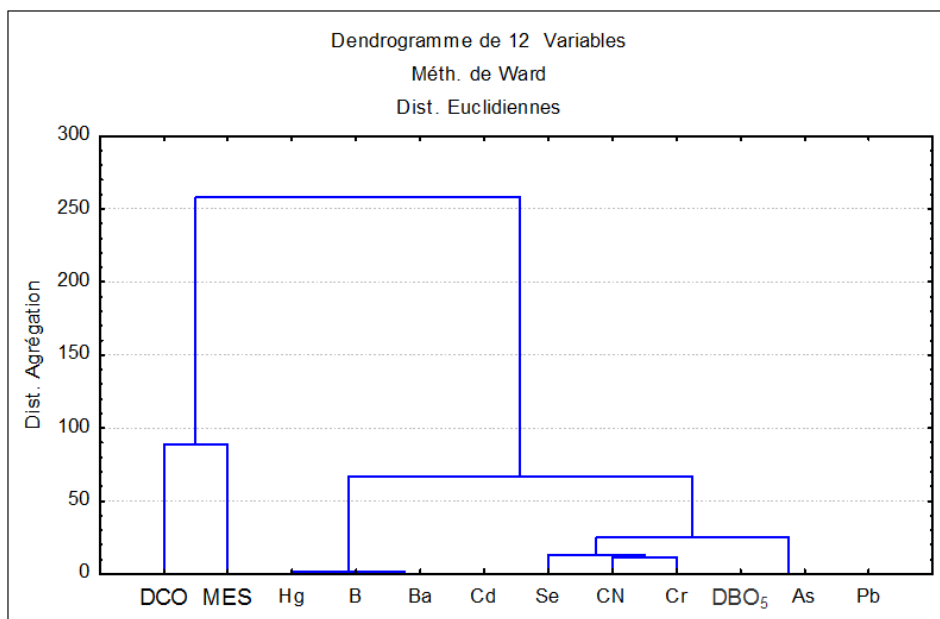


Figure 5 : *Dendrogramme des paramètres étudiés (année 2016)*

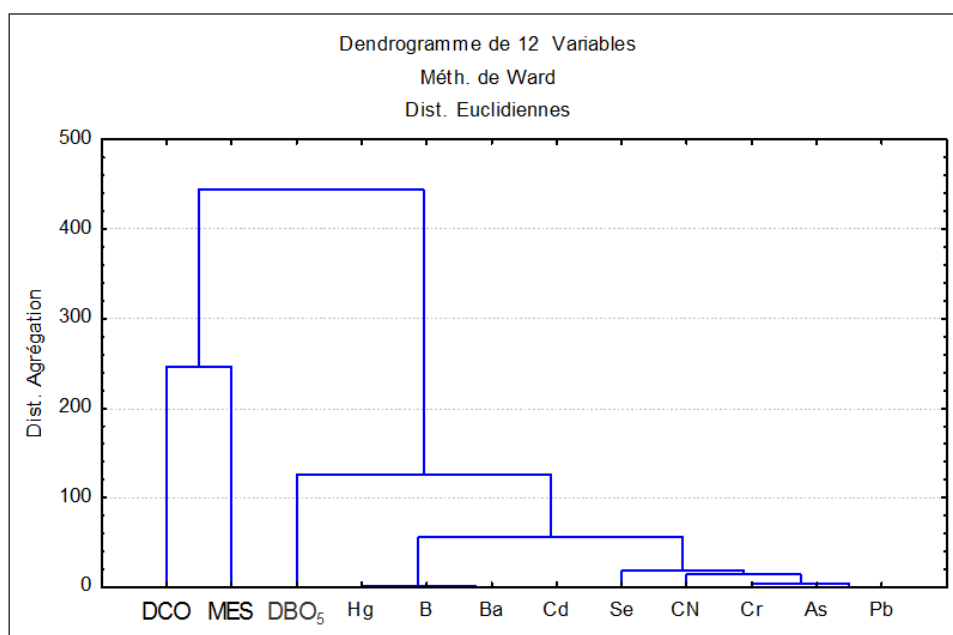


Figure 6 : *Dendrogramme des paramètres étudiés (année 2018)*

4. Discussion

4-1. Analyse et suivi de l'évolution de 2016 à 2018 des composés dans les eaux

Les résultats d'analyse des métaux lourds obtenus durant les années 2016 et 2018 dans les districts des Savanes et du Denguélé, montrent qu'ils sont présents dans les eaux à des concentrations largement inférieures aux seuils admissibles requis par l'OMS pour les eaux de consommation [17]. En clair, cela indique que les métaux analysés ont des proportions qui ne présentent pas de risque de toxicité pour les consommateurs. Ces résultats concordent avec les observations faites par plusieurs travaux estimant que les

métaux lourds sont naturellement (ou habituellement) présents à de faibles teneurs (à l'état de traces, moins de 0.1 %) dans les sols, les sédiments, les eaux de surface, justifiant leur appellation d'Eléments Traces Métalliques (ETM) [9, 24, 25]. Cependant, même si ces métaux lourds sont le plus souvent présents à l'état de trace, ils n'en restent pas moins très dangereux, puisque leur toxicité se développe par bio-accumulation dans les organismes. Par ailleurs, certains auteurs affirment que leur persistance dans l'environnement (eau, sol, air) peut conduire à une accumulation de ces molécules dans la chaîne alimentaire [26]. En outre, pour certains éléments comme le plomb, de très faibles doses peuvent être toxiques, démontrant ainsi qu'il n'existe pas de seuil d'ingestion sans danger pour la santé [27]. L'évolution sur les deux années d'observations révèle que les composés métalliques enregistrent des concentrations qui ne varient pratiquement pas dans les différentes unités de production d'eau potable. En revanche, on constate une évolution significative des teneurs de la MES, la DCO et à degré moindre la DBO₅. Soulignons que si ces teneurs élevées n'impactent pas directement la santé des consommateurs, ce résultat indique néanmoins que durant l'année 2018, les stations d'eau brute enregistrent des eaux très chargées qui perturbent sur la clarté des eaux et posent de nombreux inconvénients dans l'efficacité du traitement des eaux par l'opérateur (*Source*: SODECI, région du Poro). En effet, en très grande quantité, les MES constituent une source de pollution solide des eaux [28]. Les travaux de [29] révèlent que les fortes concentrations en MES observées pourraient être attribuées à une forte production primaire de phytoplancton, la remise en suspension des sédiments par le brassage des vents, ou par les différentes activités anthropiques menées au niveau des stations. Il faut signaler à proximité des unités de production d'eau potable de nombreuses habitations ainsi que des périmètres de cultures maraîchères. Les valeurs des matières en suspension en période de pluie sont élevées par rapport à celles de la période sèche. Ceci est dû à des pluies abondantes qui entraînent une très forte érosion des terrains au voisinage [28]. Notons que les analyses effectuées par le laboratoire en période pluvieuse peuvent donc justifier ces valeurs élevées. En conséquence, une telle hausse peut aussi entraîner un réchauffement de l'eau [30], et être à l'origine d'une prolifération de micro-organismes et d'algues. Cette analyse est corroborée par l'augmentation des teneurs en DCO et DBO₅ de 2016 à 2018 qui est un indicateur d'une pollution d'origine organique. Le rapport DCO/DBO₅ donne une indication sur l'origine de la pollution organique. Ce rapport est proche en moyenne de 1 dans les différentes stations, ce qui indique une biodégradabilité des rejets d'eaux usées [31].

4-2. Origine des métaux dans les eaux

L'étude de l'origine révèle que les métaux lourds sont associés aux particules en suspension dans les eaux et par conséquent à la matière organique et minérale dissoute ou sous forme de particule dans les eaux. En effet, les métaux déposés sur les sols peuvent cependant atteindre les cours d'eau par ruissellement au cours des événements pluviaux [32]. La plupart des métaux dans les eaux de ruissellement sont majoritairement associés aux matières en suspension ou aux colloïdes [33]. Le rôle des matières en suspension (MES) dans le transport des métaux dans les cours d'eau est en général beaucoup plus important que celui de la phase dissoute [34]. Les MES jouent donc un rôle très important dans les cours d'eau en tant que vecteurs d'éléments, car les métaux sont souvent contrôlés par les processus d'interaction entre la phase dissoute et la phase solide, comme l'adsorption, la nucléation ou la dissolution, processus qui sont contrôlés notamment par le potentiel redox de surface [35]. Il existe un autre processus, pouvant affecter la mobilité du métal, c'est la complexation avec des colloïdes mobiles. En effet, du fait de leur petite taille, de leur surface spécifique élevée et de leurs propriétés de charges, les colloïdes mobiles (minéraux et organiques) ont potentiellement une forte affinité pour les ETM [36]. En outre, Les bactéries sont aussi des colloïdes qui peuvent influencer le comportement des métaux [3]. Enfin, une fois que les métaux lourds ont été libérés dans le milieu, soit par des processus naturels (ex. altération) ou anthropiques (ex. exploitation minière) depuis leur source, ils peuvent être transportés par voie éolienne via des aérosols ou par voie aqueuse via l'eau, les matières en suspension ou les sédiments de fond des cours d'eau [7].

5. Conclusion

L'objectif de cette étude était d'analyser et suivre l'évolution de quelques paramètres physico-chimiques et métaux traces dans les stations d'eau brute des districts des Savanes et du Denguélé. Les résultats indiquent que les éléments métalliques analysés sont répartis suivant des concentrations qui ne présentent pas de risque de toxicité pour les consommateurs, au regard des directives OMS (2017). Par ailleurs, le calcul de l'index de géoaccumulation révèle une seule classe à savoir, sans à légère contamination en ETM ($0 > I_{geo} > 1$) dans toutes les unités. Le suivi de l'évolution des paramètres de 2016 à 2018 montrent que leurs teneurs ne varient quasiment pas dans les eaux, à l'exception de la matière en suspension (MES), la demande chimique en oxygène (DCO) et à un moindre degré la demande biologique en oxygène (DBO₅) qui évoluent significativement. Ce constat témoigne probablement d'une pollution solide et d'une augmentation de la charge de matière organique biodégradable ou non. L'origine des métaux lourds dans les eaux déterminée dans cette étude est liée aux matières en suspension (MES) et par conséquent à la matière minérale et organique dissoute, ou sous forme de particules fines dans les eaux.

Remerciements

Les auteurs remercient infiniment la direction de la SODECLI de la région de Korhogo qui a mis à leur disposition les données utiles à la réalisation de cette étude.

Références

- [1] - UNICEF/OMS, "Progrès en matière d'assainissement et d'eau potable : rapport 2015 et évaluation des OMD", (2015) 90 p. https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/204486/9789242509144_fre.pdf (consulté le 10 juin 2020)
- [2] - N. AKA, S. B. BAMBA, G. SORO et N. SORO, "Etude hydrochimique et microbiologique des nappes d'altérites sous climat tropical humide : cas du département d'Abengourou (Sud-Est de la Côte d'Ivoire)", *Larhyss Journal*, 16 (2013) 31 - 52, <http://larhyss.net/ojs/index.php/larhyss/article/view/179/169>
- [3] - INERIS, "Recommandation pour la modélisation des transferts des éléments traces métalliques dans les sols et les eaux souterraines", rapport d'étude, (2006) 119 p.
- [4] - J-P. JOST et Y. C. JOST-TSE, "Les plantes hyperaccumulatrices de métaux lourds, une solution à la pollution des sols et de l'eau", Ed. Connaissances et Savoirs, France, (2018) 161 p.
- [5] - A. CHANDESRIS, J. CANAL, M. COQUERY and N. Bougon, "Détermination du fond géochimique pour les métaux dissous dans les eaux de surface continentales", Rapport final, irstea, (2013) 231 p.
- [6] - B. J. ALLOWAY and D. C. AYRES, "Chemical Principles of Environmental Pollution". Blackie Academic and Professional, an imprint of Chapman and Hall, London, (1997) 394 p.
- [7] - A. S. M. MATIAS, "Contamination en métaux lourds des eaux de surface et des sédiments du val de milluni (Andes Boliviennes) par des déchets miniers. Approche géochimique, minéralogique et hydrochimique", Thèse de Doctorat en Sciences de la Terre et Environnement, Université de Toulouse, (2008) 381 p.
- [8] - P. FREYSSINET, P. PIANTONE, M. AZAROUAL, M. ITARD, Y. CLOZEL-LELOUP, B. GUYONNET and J. C. BAUDRON, "Chemical changes and leachate mass balance of municipal solid waste bottom ash submitted to weathering", *Waste Management*, 22 (2) (2002) 159 - 172
- [9] - E. CALLENDER, "Heavy Metals in the Environment-Historical Trends, In B.S. Lollar (Ed.), Environmental Geochemistry. Treatise on Geochemistry", *Elsevier-Pergamon*, (2003) 67 - 105

- [10] - S. SUKANDAR, K. YASUDA, M. TANAKA and I AOYAMA, "Metals leachability from medical waste incinerator fly ash : A case study on particle size comparison", *Environmental Pollution*, 144 (3) (2006) 726 - 735
- [11] - REPCI, "Rapport sur l'état et le devenir de la population de la Côte d'Ivoire, population et développement : défis et perspectives pour la Côte d'Ivoire", (2006) 24 p.
- [12] - H. S. ZAGBAÏ, F. BERTI et P. LEBAILLY, "Impact de la dynamique cotonnière sur le développement rural. Étude de cas de la région de Korhogo, au Nord et au Centre de la Côte d'Ivoire", *Biotechnological Agronomic Social Environmental*, 10 (4) (2006) 325 - 334
- [13] - C. DIOP, D. DEWAELE, A. TOURE, M. CABRAL, F. CAZIER, M. FALL, B. OUDDANE et A. DIOUF, "Étude de la contamination par les éléments traces métalliques des sédiments côtiers au niveau des points d'évacuation des eaux usées à Dakar (Sénégal) ", *Revue sciences de l'eau*, 25 (3) (2019) 277 - 285, <https://doi.org/10.7202/1013107ar>
- [14] - M. I. M. SAID, S. SABRI, S. AZMAN and K. MUDA, "Arsenic, Cadmium and Copper in Gastropod *Strombus canarium* in Western Part of Johor Straits", *World Applied Sciences Journal*, 23 (6) (2013) 734 - 739
- [15] - OMS, "Surveillance of drinking-water quality. Genève, Organisation mondiale de la Santé", (1976)
- [16] - MINAGRI, "Rapport d'activités 2012. Ministère de l'agriculture, Direction régionale des savanes", (2012) 53 p.
- [17] - OMS, "Directive de qualité pour l'eau de boisson", 4e éd. intégrant le premier additif [Guidelines for drinking-water quality : 4th ed. incorporating first addendum], (2017) 454 p.
- [18] - G. MÜLER, "Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River", *Geojournal*, 2 (1969) 109 - 118
- [19] - A. H. SMITH, E. O. LINGAS and M. RAHMAN, "Contamination of drinking-water by arsenic in Bangladesh : a public health emergency", *Bulletin of the World Health Organization*, 78 (9) (2000) 1093 - 1103
- [20] - D. L. SPARKS, "Environmental soil chemistry", Academic Press, (1998) 267 p.
- [21] - M. A. H. BHUIYAN, L. PARVEZ, M. A. ISLAM, S. B. DAMPARE and S. SUZUKI, "Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in the northern part of Bangladesh", *Journal of Hazardous Materials*, 173 (2010) 384 - 392
- [22] - V. CLOUTIER, R. LEFEBVRE, R. THERRIEN and M. M. SAVARD, "Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system", *Journal of Hydrology* 353, (2008) 294 - 313
- [23] - M. T. HUSSEIN, "Hydrochemical evaluation of groundwater in the Blue Nile Basin, eastern Sudan, using conventional and multivariate techniques", *Hydrogeology Journal*, 12 (2004) 144 - 158
- [24] - V. MEMET and S. BÜLENT, "Assessment of nutrient and heavy metal contamination in surface water and sediments of the upper Tigris River, Turkey", *Catena*, 92 (2012) 1 - 10
- [25] - A ZAHRA, M. Z. HASHMI, R. N. MALIK and Z. AHMED, "Enrichment and geo-accumulation of heavy metals and risk assessment of sediments of the Kurang Nallah—Feeding tributary of the Rawal Lake Reservoir, Pakistan", *Sciences of The Total Environment*, 470 - 471 (2014) 925 - 933
- [26] - B. P LANPHEAR, "Low-level toxicity of chemicals : No acceptable levels?", *PLoS Biology*, 15 (12) e2003066 (2017) 1 - 8, <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2003066>
- [27] - S. MARRE, P. MOSONI et P. PEYRET, "Effets des polluants environnementaux et alimentaires sur le microbiote intestinal", *Cahier de Nutrition et de Diététique*, 55 (5) (2020) 255 - 262
- [28] - M. MAKHOUKH, M. SBAA, A. BERRAHOU et M. C. VAN, "Contribution à l'étude physico-chimique des eaux superficielles de l'oued Moulouya (Maroc Oriental) ", *Larhyss Journal*, 9 (2011) 149 - 169, <http://larhyss.net/ojs/index.php/larhyss/article/view/121>

- [29] - I. YACOUB, M. K. AKA, B. K. DONGUI et J. BIEMI, "Caractéristiques physico-chimiques d'une lagune côtière tropicale : lagune de Fresco (Côte d'Ivoire), *Afrique Science*, 04 (3) (2008) 368 - 393, <http://www.afriquescience.info/document.php?id=1172>
- [30] - S. HEBERT et S. LEGRE, "Suivi de la qualité de l'eau des rivières et petits cours d'eau. Direction du suivi de l'état de l'environnement, Ministère de l'Environnement Gouvernement du Québec", (2000) 5 p.
- [31] - CPEPESC, "Les différents paramètres physiques et chimiques des eaux et commentaires", (2017) <https://www.cpepesc.org/Les-principaux-parametres.html> (Consulté le 20 Février 2020)
- [32] - M. C. GROMAIRE, S. GARNAUD, M. SAAD and G. CHEBBO, "Contribution of different sources to the pollution of wet weather flows in combined sewers", *Water Research*, 35 (2) (2001) 521 - 533
- [33] - D. K. MAKEPEACE, D. W. SMITH and S. J. STANLEY, "Urban Stormwater quality : summary of contaminant data", *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 25 (2) (1995) 93 - 139
- [34] - D. E. WALLING and D. FANG, "Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers. Global and Planetary Change", 39 (1 - 2) (2003) 111 - 126
- [35] - W. STUMM, "Chemistry of the solid-water interface; processes at the mineral-water and particle-water interface in natural systems, Ed. John Wiley and Sons, New York, NY, United States, (1992) 428 p.
- [36] - L. CITEAU, "Etude des colloïdes naturels présents dans les eaux gravitaires de sols contaminés : relation entre nature des colloïdes et réactivité vis-à-vis des métaux (Zn, Cd, Pb, Cu)", Thèse de doctorat de l'Institut National d'Agronomie Paris-Grignon (INA-PG), (2004) 296 p.