

Caractérisation physico-chimique des eaux des forages des villages de Tanlili et Lilgomdé dans la région Nord du Burkina Faso - Corrélation entre les paramètres physico-chimiques

Corneille BAKOUAN^{1,2*}, Boubié GUEL¹ et Anne-Lise HANTSON²

¹ *Laboratoire de Chimie Moléculaire et des Matériaux, Unité de Formation et de Recherche en Sciences Exactes et Appliquées, Université Ouaga I Pr Joseph KI-ZERBO, 03 BP 7021 Ouagadougou 03, Burkina Faso*

² *Université de Mons, Faculté Polytechnique, Service de Génie des Procédés Chimiques et Biochimiques, 56, rue de l'Épargne, B-7000 Mons, Belgique*

* Correspondance, courriel : bakouancorneille@yahoo.fr

Résumé

La présente étude consiste à évaluer la qualité physico-chimique des eaux des forages de Tanlili et Lilgomdé. L'analyse en composantes principales (ACP) a permis de faire ressortir les corrélations entre les différents paramètres physico-chimiques et de comprendre les processus pouvant être à l'origine de la minéralisation. Les pH de ces eaux sont voisins de la neutralité avec un caractère plus au moins alcalin à l'exception du forage N°1 de Tanlili qui a un caractère acide. Les pH enregistrés ont une moyenne de $6,6 \pm 0,6$; $7,8 \pm 0,2$; $7,4 \pm 0,4$ et $7,7 \pm 0,4$ respectivement pour Tanlili 1, Tanlili 2, Lilgomdé 1 et Lilgomdé 2. Les teneurs moyennes en arsenic total de ces eaux sont de $0,10 \pm 0,01$ mg / L ; $0,13 \pm 0,01$ mg / L ; $0,24 \pm 0,05$ mg / L et $1,99 \pm 0,06$ mg / L respectivement pour Lilgomdé 1, Lilgomdé 2, Tanlili 1 et Tanlili 2. Les résultats montrent que les eaux des forages des deux localités ne sont pas conseillées à la consommation humaine. Le paramètre qui décline ces eaux souterraines comme eau potable est la teneur en arsenic qui est supérieure à la norme de l'OMS (0,01 mg / L). Les eaux souterraines de ces localités sont classées bicarbonatées, calciques, sodiques, potassiques et magnésiennes.

Mots-clés : *Tanlili, Lilgomdé, eau souterraine, Arsenic, ACP.*

Abstract

Physicochemical characterization of ground waters in Tanlili and Lilgomdé villages in the Northern region of Burkina Faso - Correlation between the physicochemical parameters

The present study consists in evaluating the physico-chemical quality of the waters of drillings of the Tanlili and Lilgomdé. Principal Component Analysis (PCA) has highlighted the correlations between the different physico-chemical parameters and the processes that may be responsible for the mineralization. The pH of waters are close to neutrality with a more or less alkaline character, except for the drilling the Tanlili 1, which has an acidic character. The pH recorded have an average of 6.6 ± 0.6 ; 7.8 ± 0.2 ; 7.4 ± 0.4 and 7.7 ± 0.4 respectively for Tanlili 1, Tanlili 2, Lilgomdé 1 and Lilgomdé 2. The average contents total arsenic of these water are of $0,10 \pm 0,01$ mg / L; $0,13 \pm 0,01$ mg / L; $0,24 \pm 0,05$ mg / L and $1,99 \pm 0,06$ mg / L respectively

for Lilgomdé 1, Lilgomdé 2, Tanlili 1 and Tanlili 2. The results show that water of drillings of the two localities is not advised at human consumption. The parameter which downgrades these groundwaters as drinking water is the arsenic content which is higher than the standard of WHO (0,01 mg / L). The groundwater of these localities are classified bicarbonate, calcium, sodium, potassium and magnesium.

Keywords : *Tanlili, Lilgomdé, groundwater, Arsenic, PCA.*

1. Introduction

L'eau est essentielle pour la santé humaine et des autres êtres vivants, et l'approvisionnement adéquat en l'eau potable est important pour le développement socio-économique d'une région [1 - 3]. Son accès par des populations rurales pour la consommation est devenu un problème crucial du fait de la pollution de l'environnement et des ressources naturelles. Par conséquent, l'eau qui est source de vie, devient source de maladies. Les personnes qui utilisent de l'eau souterraine contaminée comme eau potable peuvent souffrir de maladies à l'avenir. De nombreuses régions du monde dépendent entièrement des ressources en eaux souterraines pour diverses utilisations. Les eaux souterraines contaminées par divers polluants qui les rendent impropres à la consommation peuvent mettre en péril la vie humaine et animale ainsi que l'environnement dans son ensemble. Des actions concrètes spécifiques sont donc nécessaires pour contrôler le risque de pollution de l'eau et protéger la qualité naturelle des eaux souterraines [4]. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé, environ 1,1 milliard de personnes n'ont pas accès à l'eau potable et 2,4 milliards n'ont pas accès à un système d'assainissement adéquat. Plus de 2 millions de personnes, surtout des enfants de moins de cinq ans des pays en développement où les mesures d'hygiène et d'assainissement sont insuffisantes, meurent chaque année des maladies diarrhéiques [5, 6]. Les eaux issues des nappes souterraines et superficielles sont des ressources exploitées par l'homme pour divers usages. La composition chimique d'une eau issue du milieu naturel est très variable. Elle dépend de la nature géologique du sol d'où elle provient et des substances réactives qu'elle a rencontrées lors de l'écoulement [7]. La dégradation des ressources en eau souterraine est devenue, durant ces dernières décennies, une préoccupation mondiale [8, 9]. Les eaux souterraines sont traditionnellement les ressources en eau privilégiées pour la production d'eau potable, car moins vulnérables aux pollutions que les eaux de surface. Toutefois, certaines caractéristiques minimales sont exigées pour qu'elles puissent être exploitées comme eau potable qui doit, elle-même satisfaire à des normes de qualité physico-chimique et biologique [10]. La qualité naturelle de ces eaux souterraines peut être altérée par des activités anthropiques ou des phénomènes naturels. Ainsi, la composition quantitative et qualitative de l'eau souterraine en matières en suspension et dissoutes, de nature minérale ou organique détermine sa qualité [7]. L'étude des caractéristiques de ces eaux souterraines est souvent destinée à préciser les variations potentielles de leur qualité et à comprendre leur origine [11]. Le présent travail s'intéresse à l'étude de la qualité physico-chimique des eaux de forages de Tanlili et Lilgomdé, ainsi qu'à la détermination des principaux faciès chimiques. Il est important de connaître certains paramètres physico-chimiques, qui pourraient être la cause de nombreux problèmes car la mauvaise qualité de l'eau de boisson est un problème de santé publique.

2. Matériel et méthodes

2-1. Géologie régionale et la zone d'étude des eaux de forages

Les sites d'étude (*Figure 1*) appartiennent au degré carré de Kaya situé entre le parallèle 13° et 14° de latitude Nord et les méridiens 1° et 2° de longitude Ouest. Les zones d'étude se situent à proximité de la ville de Ouahigouya dans les provinces du Yatenga et Zondoma (Région Nord) du nord du Burkina Faso. Comme

la région se trouve à la lisière sud du Sahel, le climat est aride avec une pluviométrie annuelle généralement inférieure à 600 mm [12]. La géologie de la zone d'étude se compose principalement de roches volcano-sédimentaires et plutoniques du Birimian et d'intrusions granitiques et alcalino-granitiques plus tardives d'Eburnian. Les formations birimiennes sont constituées de schistes schisteux et graphitiques à quartzite, andésite, métabasalte et tuf ainsi que des tonalités intrusives, des gabbros et de diorites à quartz [12]. Les roches volcano-sédimentaires birimiennes ont été interprétées comme un système d'îlots andésitique-basaltique, intrus par des tonalités étendues d'affinité calco-alcaline. Ceux-ci sont envahis par des granitoïdes ultérieurs et des granites alcalins. Les villages de Tanlili et Lilgomdé dont les forages ont fait l'objet de cette étude sont situés respectivement à environ 40 km et 10 km de Ouahigouya, chef-lieu de cette région. Au total quatre forages ont fait l'objet de cette étude, deux forages dans le village de Tanlili et deux à Lilgomdé (**Tableau 1**). Les études ont été menées du mois de janvier au mois de décembre 2015. La **Figure 2** représente la zone de Ouahigouya avec les différentes concentrations en As dans les forages et puits. La région est caractérisée par une longue saison sèche d'Octobre à Mai et une saison pluvieuse de Juin à Septembre. L'approvisionnement en eau des populations se fait au niveau des forages de ces villages.

Tableau 1 : Références et coordonnées géographiques des sites d'étude

Villages	Forages	Références	Coordonnées géographiques	
			Latitude Nord	Longitude Ouest
Tanlili	1	1996/DRHN/28057/001	13°24'19,8''	02°09'34,1''
	2	1997/DRHN/28057/002	13°24'18,1''	02°09'32,6''
Lilgomdé	1	1990/DRHN/290715/003	13°36'53,7''	02°22'22,8''
	2	1986/DRHN/290715/001	13°36'43,8''	02°22'15,1''

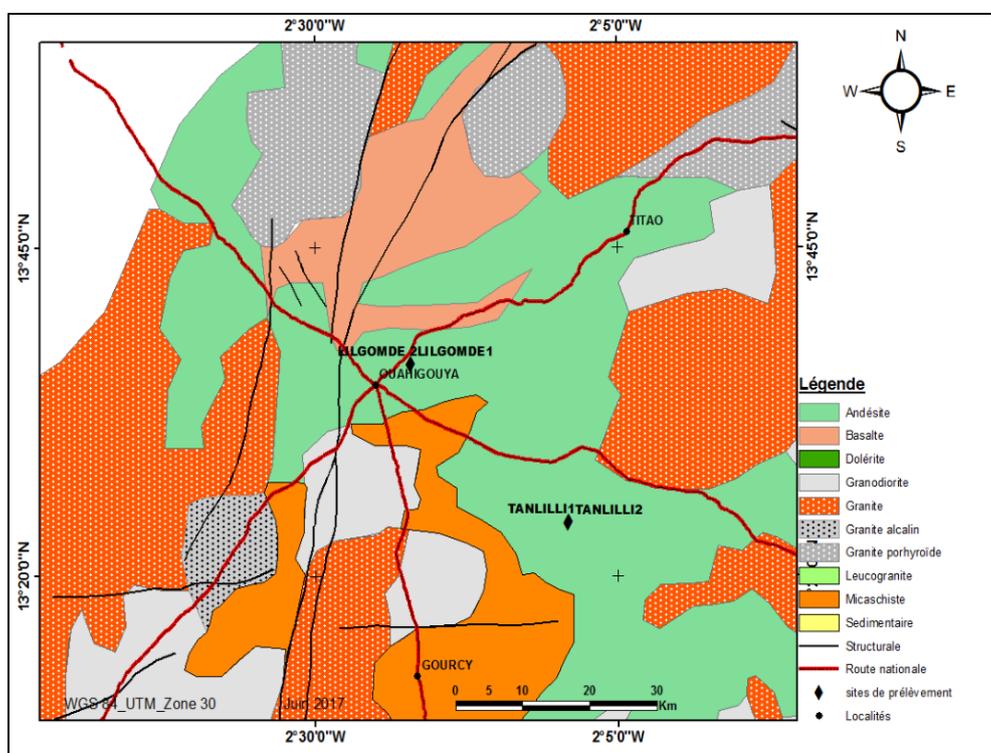


Figure 1 : Localisation des sites d'études sur la carte de Yatenga et caractéristiques géologiques du sol

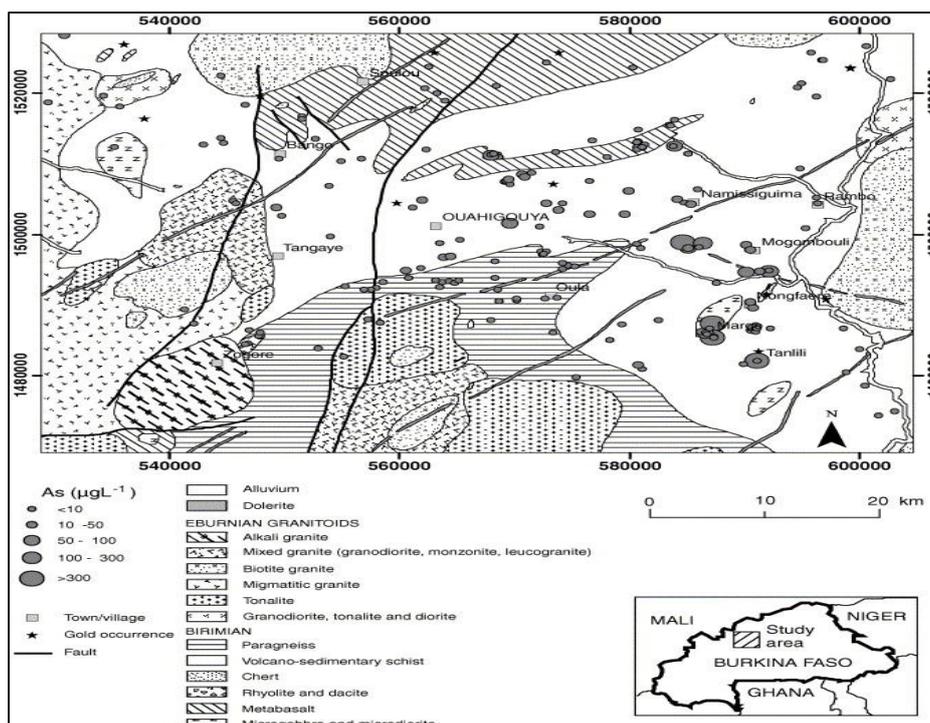


Figure 2 : Carte géologique de la zone de Ouahigouya montrant les concentrations d'arsenic dans les eaux souterraines provenant des forages et des puits [12]

2-2. Méthodes expérimentales

Pour atteindre les objectifs assignés à cette étude, la méthodologie suivante a été adoptée : afin de caractériser les eaux des forages de Tanlili et de Lilgomdé, de déterminer les paramètres physico-chimiques de ces eaux et leur variabilité. Des échantillons d'eau ont été prélevés et mis dans des bouteilles en polyéthylène basse densité de capacité 1 litre, préalablement lavées à l'acide nitrique puis à l'eau distillée. Sur le terrain, avant le remplissage des bouteilles, celles-ci ont été lavées trois fois avec l'eau à prélever. Le remplissage des bouteilles a été fait à ras bord puis le bouchon vissé afin d'éviter tout échange gazeux avec l'atmosphère. Les échantillons d'eau ont été ensuite transportés dans une glacière à 4 °C au laboratoire pour analyse chimique ultérieure. Deux bouteilles séparées ont été prélevées. Le premier flacon a été acidifié avec HNO₃ (0,1% v/v, Merck) pour des cations majeurs et le second non acidifié pour l'analyse des anions. Le **Tableau 2** résume l'ensemble des paramètres et éléments chimiques analysés ainsi que les méthodes analytiques utilisées.

Tableau 2 : Méthodes d'analyses physicochimiques des eaux de forages

Paramètres	Unités	Matériel
pH	/	un pH-mètre portatif 826 de marque Metrohm et mesure <i>in-situ</i>
Température (T)	°C	
Conductivité Electrique (CE)	µS / cm	un conductimètre portatif Phenomenal CO 3000 H et mesure <i>in-situ</i>
Potentiel redox (Eh)	mV	un stylo portatif ORP 15 et mesure <i>in-situ</i>
Oxygène dissous (O)	%	un oxymètre portatif DO200 et mesure <i>in-situ</i>
Dureté (TH)	°F	Dosage compléxométrique à l'aide de l'EDTA avec le NET (Noir Eriochrome T) et Patton et Reeder comme indicateurs
Mg ²⁺ et Ca ²⁺	mg / L	
Al, As, Cu, K, Mn, Na, Ba, Fe	mg / L	Filtration sur membrane en polyfluorure de vinylidène hydrophile de 0,45µm et dosage par ICP- AES-IRIS Intrepid II XSP
TAC	mg / L de CaCO ₃	Dosage à l'aide d'acide sulfurique à 0,02N avec l'hélianthine comme indicateur
NO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , PO ₄ ³⁻ , SO ₄ ²⁻	mg / L	Spectrophotomètre (Hach Lange DR 3800)

L'Indice de Ryznar, qui est un indice dit de stabilité, est défini par *l'Équation (1)*.

$$IRz = 2pH_s - pH_{réel} \quad (1)$$

pHs et pHréel étant les pH de saturation et mesuré in-situ respectivement.

Le pH de saturation est déterminé en mélangeant 250 mL de l'échantillon avec 2 g de CaCO₃. Le mélange est mis sous agitation pendant 24 heures, et laissé au repos pendant 6 heures. Le surnageant est recueilli pour la mesure du pH. Les résultats des analyses physico-chimiques ont été traités par des méthodes d'analyse statistique multivariée couplées aux méthodes hydrochimiques. La méthode hydrochimique a nécessité l'utilisation du diagramme de Piper représenté sous le logiciel Diagrammes, pour la classification hydrochimique des eaux. La réalisation de ce diagramme a été faite en utilisant le logiciel Diagrammes 5.6 conçu par [13]. Ce diagramme a été utilisé par plusieurs auteurs pour le traitement des données et a donné des résultats satisfaisants [11, 14, 15].

3. Résultats et discussion

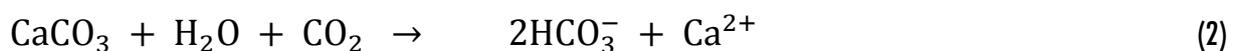
3-1. Évaluation de la potabilité des eaux de Tanlili et Lilgomdé

La température des eaux des forages varie entre 28 et 33 °C, avec des moyennes autour de 31,3 ± 1,6 °C ; 31,1 °C ± 1,7 ; 31,5 °C ± 0,5 °C et 31,5 ± 0,9 °C respectivement pour Tanlili 1, Tanlili 2, Lilgomdé 1 et Lilgomdé 2. Les valeurs de températures relevées sont en accord avec celles rapportées dans la littérature. Les eaux souterraines sont moins sensibles aux variations de température que les eaux superficielles [16]. En effet, la variation de la température de l'eau est liée à celle de la température atmosphérique saisonnière [17]. La température de l'eau régit presque la totalité des réactions physiques, chimiques et biologiques [18]. Elle joue un rôle important dans la solubilité des sels et conditionne les équilibres de dissociation [19]. Le pH des eaux naturelles est lié à la nature des sols traversés. C'est un élément important pour définir le caractère agressif ou incrustant d'une eau [20]. Il altère la croissance et la reproduction des micro-organismes présents dans une eau. Le pH altère aussi la minéralisation et les teneurs en métaux. La plupart des bactéries peuvent croître dans une gamme de pH comprise entre 5 et 9. Les pH des eaux de forage de Tanlili et Lilgomdé sont voisins de la neutralité avec un caractère plus au moins alcalin à l'exception du forage N°1 de Tanlili qui a un caractère acide. La plupart des eaux présentent un caractère alcalin bicarbonaté du fait que le pH est inférieur à 8,3.

Les pH enregistrés au cours de cette campagne ont une moyenne de 6,6 ± 0,6 ; 7,8 ± 0,2 ; 7,4 ± 0,4 et 7,7 ± 0,4 respectivement pour Tanlili 1, Tanlili 2, Lilgomdé 1 et Lilgomdé 2. L'optimum selon l'Organisation Mondiale de la santé est situé entre 6,5 et 8,5 [10, 21]. Les valeurs de la conductivité électrique obtenues varient d'une part entre 64 µS/cm et 386 µS/cm pour les forages de Tanlili et d'autre part entre 290 µS/cm et 465 µS/cm pour les forages de Lilgomdé. Il est à noter que tous les forages, à l'exception du forage N°1 de Tanlili sont minéralisés. Le forage N°1 de Tanlili a une moyenne annuelle en dessous de la norme de l'OMS (300 µS/cm) et très variable au cours de l'année, tandis que le forage N°2 de Tanlili et les deux forages de Lilgomdé ont des moyennes respectivement autour de 323,6 ± 76,3 µS/cm ; 375,8 ± 20,7 µS/cm et 397,8 ± 59,2 µS/cm. Les valeurs moyennes des forages de Tanlili 2 et les deux forages de Lilgomdé sont toutes au-dessus de la norme de l'OMS qui est de 300 µS/cm [16]. Ces valeurs élevées au niveau du forage N°2 de Tanlili et les deux forages de Lilgomdé pourraient être dues au fait que les eaux sont riches en ions monovalents et divalents [22]. En effet, plus la conductivité est élevée plus l'eau est fortement minéralisé. La conductivité d'une eau naturelle est comprise entre 50 et 1500 µS/cm [19]. Le potentiel redox (Eh) des échantillons varie entre 90 mV et 274 mV. Les valeurs faibles sont enregistrées au cours de la première

campagne, et avec les campagnes qui ont suivi, nous avons enregistré des valeurs moyennes autour de $185,5 \pm 47,2$ mV ; $152,7 \pm 48,7$ mV ; $213,8 \pm 22,5$ mV et $216,7 \pm 34,2$ mV respectivement pour Tanlili 1, Tanlili 2, Lilgomdé 1 et Lilgomdé 2. Le pourcentage de saturation en O_2 dans les eaux de forage varie entre 16 % et 68 % au cours de la campagne avec des moyennes autour de $47,7 \pm 11,1$ % ; $26,3 \pm 6,7$ % ; $21,9 \pm 7,2$ % et $46,9 \pm 3,9$ % respectivement pour Tanlili 1, Tanlili 2, Lilgomdé 1 et Lilgomdé 2. Ces valeurs du pourcentage de saturation de ces eaux sont en accord avec les valeurs du potentiel redox. La dureté totale des échantillons analysés varie comme suit : entre 2,0 et $5,7^\circ F$ pour les forages de Tanlili avec des valeurs moyennes autour de $3,4 \pm 1,3$ et $4,9 \pm 0,7$ $^\circ F$ respectivement pour Tanlili 1 et Tanlili 2 ; entre 6,0 à $7,8$ $^\circ F$ pour les forages de Lilgomdé avec des valeurs moyennes autour de $6,3 \pm 0,2$ et $7,6 \pm 0,1$ $^\circ F$ respectivement pour Lilgomdé 1 et Lilgomdé 2. La dureté de l'eau est un indicateur du niveau de calcaire dans l'eau. Elle correspond à sa teneur en calcium et en magnésium [23]. Plus une eau en contient, plus elle est « dure ». Selon le guide OMS, boire de l'eau calcaire ou dure n'est pas contre-indiqué. En se référant au **Tableau 3**, on peut noter que tous les échantillons d'eaux des deux localités présentent des valeurs de dureté faibles et peuvent être classées parmi les eaux douces. La teneur en calcium des échantillons est comprise entre 4,8 et 25,2 mg / L au cours de la campagne d'étude avec des moyennes autour de $9,4 \pm 4,6$; $16,13 \pm 2,4$; $16,4 \pm 8,1$ et $17,7 \pm 4,1$ mg / L respectivement pour Tanlili 1, Tanlili 2, Lilgomdé 1 et Lilgomdé 2.

Ces valeurs sont inférieures à la norme de l'OMS qui est de 270 mg / L [16]. L'excès de Ca^{2+} provoque des concrétions dans le corps tels que calculs rénaux ou vésiculaires et irritation urinaire [24, 25]. Les teneurs en magnésium sont comprises entre 1,9 et 3,1 mg / L pour le forage N°1 de Tanlili, 1,4 et 2,4 mg / L pour le forage N°2 de Tanlili, 0,7 et 11,5 mg / L pour le forage N°1 de Lilgomdé et pour Lilgomdé 2, la concentration est comprise entre 4,3 et 11,0 mg / L. Les variations des teneurs en magnésium sont très faibles au cours de la campagne d'étude. Le TAC est la grandeur utilisée pour mesurer le taux d'hydroxydes, de carbonates et de bicarbonates d'une eau et s'exprime en mg / L de $CaCO_3$. La variation de TAC au cours de l'année n'est pas importante pour l'ensemble des sites étudiés, à l'exception du forage 1 de Tanlili où les valeurs décroissent très fortement au cours de l'année passant de 140 mg / L de $CaCO_3$ à 11,7 mg / L de $CaCO_3$. Les autres sites ont des moyennes autour de $154,8 \pm 13,1$ mg / L de $CaCO_3$ pour le forage 2 de Tanlili, $146,8 \pm 7,3$ mg / L de $CaCO_3$ et $179,8 \pm 16,8$ mg / L de $CaCO_3$ respectivement pour les forages 1 et 2 de Lilgomdé. Plus le TAC est élevé, plus il est difficile de faire varier le pH de l'eau. Ainsi, les alcalinités assurent la protection des métaux contre la corrosion. Les teneurs en bicarbonates dans nos échantillons d'eau ont été déterminées et varient entre 14,3 mg / L et 242,8 mg / L. Ces ions peuvent provenir de la dissolution de formations carbonatées selon **l'Équation (2)**:



Les teneurs en bicarbonates des forages étudiés varient comme suit : 14,3 mg / L à 170,8 mg / L (Tanlili 1), 170,8 mg / L à 217,2 mg / L (Tanlili 2), 16,9 mg / L à 190,3 mg / L (Lilgomdé 1) et 186,7 à 242,8 mg / L (Lilgomdé 2). Le forage 2 de Lilgomdé présente les valeurs les plus élevées de dureté, de conductivité et de bicarbonate par rapport aux autres forages. Ces valeurs élevées peuvent s'expliquer par le fait que la minéralisation se traduit par la teneur globale en sels dissous tels que les carbonates, les bicarbonates, les sulfates, etc. L'indice de Ryznar (IRz) permet de définir la tendance agressive ou entartrante d'une eau. Des classes de risques de corrosion sont établies en fonction des valeurs de IRz. Nous avons des valeurs moyennes au cours de l'année autour de $9,4 \pm 0,7$ $^\circ F$; $8,9 \pm 0,2$ $^\circ F$; $9,3 \pm 0,5$ $^\circ F$ et $9,2 \pm 0,3$ $^\circ F$ respectivement pour Tanlili 1, Tanlili 2, Lilgomdé 1 et Lilgomdé 2. Toutes les eaux analysées ont un indice de Ryznar supérieur à $8,5$ $^\circ F$. Au regard des valeurs de l'indice de Ryznar, ces eaux peuvent être considérées comme corrosives. Pour confirmer ou infirmer l'agressivité des eaux des localités de Tanlili et Lilgomdé, nous avons calculé d'autres indices donnant une idée sur l'agressivité des eaux. Il s'agit de l'indice Langelier et de l'indice de Leroy.

L'indice de Langelier (IL) est défini par l'**Équation (3)**[26].

$$IL = pH - pH_S \tag{3}$$

Si l'indice de Langelier est positif, l'eau est incrustante et fait précipiter le carbonate de calcium sous l'action de CO₂ et s'il est négatif l'eau est agressive. L'indice de Leroy (ID) est défini par l'**Équation (4)**[26].

$$ID = \frac{TAC}{TH} \tag{4}$$

TAC et TH étant le titre alcalimétrique complet et la dureté totale respectivement.

Il permet de confirmer ou non la tendance à la corrosion d'une eau. Avec des concentrations exprimées en meq / L. L'eau est considérée comme faiblement corrosive si l'indice est compris entre 0,7 et 1,3 et corrosive si l'indice est supérieur à 1,3. Les indices de Langelier calculés à partir de l'**Équation (3)** sont -1,4 ; -0,6 ; -1 et -0,7 pour Tanli1, Tanlili 2, Lilgomdé 1 et Lilgomdé 2 respectivement. Ces indices sont tous négatifs, ce qui suggère un caractère agressif des eaux. Pour les indices de Leroy, calculés à partir de l'**Équation (4)**, et qui sont Tanlili 1 (1,7), Tanlili 2 (3,2), Lilgomdé 1 (2,3) et Lilgomdé 2 (2,4). Ces indices sont tous supérieurs à 1,3, ce qui suggère un caractère corrosif des eaux des deux localités. Les indices de Langelier et de Leroy ont permis de confirmer la corrosivité et l'agressivité des eaux de Tanlili et Lilgomdé. Les concentrations en As, K, Na, Al, Ba, Cu, Mn et Fe déterminées par ICP-AES sont consignées dans le **Tableau 4**. Les teneurs de ces éléments sont faibles et inférieures aux valeurs guides de l'OMS, à l'exception de l'arsenic et de l'aluminium dont les teneurs sont supérieures à la norme de l'OMS. Nous remarquons dans ce tableau que les teneurs en arsenic total sont supérieures à la norme de l'OMS (0,01 mg / L). Le forage 2 de Tanlili a une teneur en As total très élevée atteignant plus de cent fois la concentration autorisée par l'O.M.S pour les eaux destinées à la consommation humaine. Le fer est indispensable pour le corps humain, mais de très fortes concentrations affectent les propriétés organoleptiques de l'eau et tâchent aussi le linge. La valeur guide de l'O.M. S du fer total dans l'eau de boisson est de 0,3 mg / L [27]. Les forages d'eau analysés ont une concentration en fer total supérieure à la valeur guide de l'OMS, à l'exception du forage 1 de Lilgomdé (**Tableau 4**). Au niveau de la zone d'étude, les teneurs en nitrate sont très faibles et varient durant la période d'étude entre 5,3 mg / L et 19,6 mg / L. Ces teneurs restent très inférieures à la valeur admissible par la norme O.M.S qui est de 50 mg / L [16, 21]. De ce fait, les eaux étudiées ne sont pas sujettes à un risque de pollution par les nitrates. Quant aux ions sulfate, chlorure et phosphate, ils ont des teneurs très faibles dans les eaux des forages de Tanlili et Lilgomdé au cours de la campagne d'étude. Les teneurs des ions sulfate, chlorure et phosphate sont consignées dans le **Tableau 4**. Ces eaux ne posent pas de risque pour ce qui est des teneurs en ces ions.

Tableau 3 : Norme pour la dureté des eaux de boisson d'après l'O.M.S[21]

TH (°F)	0 - 7	7 - 22	22 - 32	32 - 54	≥ 54
Eau	Douce	Modérément douce	Assez douce	Dure	Très dure

Tableau 4 : Teneurs moyennes des ions des eaux de Tanlili et Lilgomdé

Concentration en éléments chimiques (mg / L)												
Forages	Al	As	Ba	Cu	Fe	K	Mn	Na	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻
Lilgomdé 1	0,23	0,10		0,004	0,07	2,17	0,002	35,65	3,64	19,64	1,49	0,99
	±	±	<LD*	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,07	0,01		0,001	0,02	0,08	0,001	2,19	0,01	0,01	0,01	0,01
Lilgomdé 2	0,29	0,13	0,03	0,007	0,44	3,89	0,003	29,08	1,11	6,49	0,13	4,59
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,02	0,01	0,01	0,001	0,01	0,08	0,001	1,35	0,01	0,01	0,01	0,01
Tanlili 1	0,69	0,24	0,16	0,36	1,64	1,61	4,12	3,38	3,13	13,91	0,78	1,96
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,12	0,05	0,01	0,02	0,07	0,19	0,23	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Tanlili 2	0,41	1,99	0,01	0,09	1,09	3,76	0,09	46,42	0,24	5,31	0,93	1,60
	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±	±
	0,11	0,06	0,01	0,01	0,37	0,12	0,01	1,77	0,01	0,01	0,01	0,01

*Limite de détection

3-2. Faciès hydrochimique

L'étude du chimisme des eaux a pour but d'identifier les faciès chimiques des eaux et la qualité de potabilité. Elle permet de suivre aussi l'évolution spatiale des paramètres physico-chimiques et d'estimer leur origine en les corrélant avec la géologie. Dans le but de bien identifier les faciès hydrochimiques et d'avoir une indication sur l'aspect qualitatif des eaux souterraines, la représentation graphique des résultats d'analyses s'avère un outil inévitable. La réalisation des diagrammes a été faite en utilisant le logiciel Diagrammes 5.6 conçu par Roland Simler (Laboratoire d'hydrogéologie, Université d'Avignon, 2007). Il est composé de deux triangles permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique et d'un losange synthétisant le faciès global. Les diagrammes de Piper (**Figure 3**) correspondent aux échantillons d'eau de deux campagnes de prélèvement (Juillet et Décembre). L'analyse du diagramme de Piper montre que les eaux des villages de Tanlili et de Lilgomdé sont majoritairement carbonatées sodico-potassiques. Sur le diagramme de Piper représenté sur la **Figure 3.a** et correspondant à la campagne du mois de Juillet, on observe dans le triangle des anions une prédominance des carbonates, qui traduit un faciès bicarbonaté. Dans le triangle des cations, aucun ion ne prédomine, ce qui traduirait un faciès mixte sodique, potassique et calcique. Ces résultats sont confirmés dans le losange où nous avons un faciès global bicarbonaté, sodique et potassique. Sur la **Figure 3.b**, nous avons représenté le diagramme de Piper correspondant aux échantillons de la campagne du mois de Décembre. Comme pour la campagne de Juillet, nous observons sur le triangle des anions une prédominance des carbonates, ce qui traduit un faciès bicarbonaté. Quant au triangle des cations, un faciès mixte sodique, potassique et magnésien est observé avec une faible empreinte calcique. Le faciès global nous confirme les résultats observés sur les deux triangles. Ce losange présente un faciès bicarbonaté calcique et magnésien avec une faible empreinte bicarbonaté sodique et potassique. Trois faciès chimiques ont été mis en évidence dans le diagramme de Piper. On rencontre dans des eaux des forages des deux localités, un faciès bicarbonaté calcique. Ceci peut être influencé par la prédominance des carbonates issus des eaux de surface. Par ailleurs, la dominance remarquable des teneurs en calcium sur celles en magnésium pourrait provenir d'une solubilisation préférentielle des minéraux de calcites riches en calcium par rapport aux dolomites. Les faibles concentrations (Mg^{2+} , Ca^{2+}) par rapport aux concentrations en HCO_3^- permettent d'envisager un échange de base entre les ions calcium issus de la dissolution du gypse et les ions sodium des différents matériaux argileux de la masse sédimentaire [21].

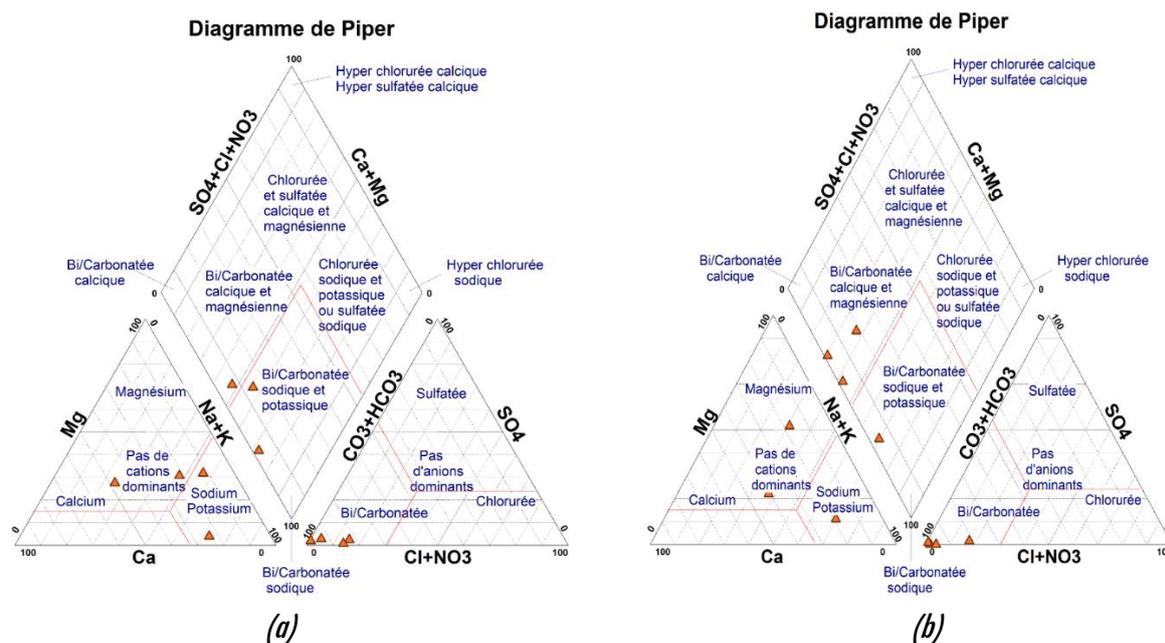


Figure 3 : Diagramme de Piper des échantillons : (a) mois de juillet et (b) mois de décembre

3-3. Analyse en Composante Principale

Dans ce travail, nous avons réalisé une analyse en composante principale (A.C.P), en vue de mettre en évidence les relations entre variables d'une part et la distribution des individus (forages) compte tenu de l'ensemble de leurs caractéristiques physico-chimiques d'autre part. L'A.C.P est une technique de représentation des données sous certains critères algébriques et géométriques. Cette technique permet de déterminer un système d'axes de référence hiérarchisés tout en diminuant le nombre des dimensions de l'espace dans lequel on projette les points-observations. Elle est utile pour l'analyse des données quantitatives se présentant sous la forme de **Tableau** à n observations et p variables [28]. Le traitement statistique des données est réalisé par le logiciel xIstat. L'analyse statistique des données physico-chimiques a été effectuée sur une matrice de données constituée de 22 variables et de 4 forages dans les villages de Tanlili et Lilgomdé, soit 22 variables et 4 individus. La matrice de corrélation a été réalisée pour 22 paramètres mesurés durant la période du mois de juillet correspondant à la saison pluvieuse. La liaison existante entre toutes les variables prises deux à deux et les coefficients de corrélation entre ces différentes variables sont donnés par la matrice de corrélation. On enregistre une corrélation parfaite égale à un (1) entre le titre alcalimétrique complet (TAC) et les ions bicarbonate. Des corrélations positives et importantes ont été enregistrées entre les différentes variables telles que : T°C-Eh (0,961), pH-C.E (0,983), pH-PO₄³⁻ (0,968), C.E-TAC (0,983), C.E- HCO₃⁻ (0,983), C.E-PO₄³⁻ (0,993), E-%O (0,957) IRz-Al (0,951), IRz-Mn (0,961), TAC-PO₄³⁻ (0,967), HCO₃⁻-PO₄³⁻ (0,968), Al-Fe (0,989), Al-Mn (0,999), Al-Cu (0,981), Fe-Mn (0,985), Fe-Cu (0,993) et Mn-Cu (0,974).

Les valeurs en gras sont des coefficients de corrélation entre les paramètres à un niveau de signification $\alpha = 0,05$. Alpha (α) un seuil de signification en statistique, ce qui signifie que le résultat observé a moins de 5 % de chances d'être obtenu par hasard. La forte association de ces paramètres semblerait montrer une possible source naturelle de la contamination de ces eaux et la pollution de source anthropique serait insignifiante. Le **Tableau 5** présente les valeurs propres, les variances exprimées pour chaque facteur et leur cumul. Les facteurs F1, F2 et F3 sont les dimensions de l'ACP. Le facteur F1, avec une variance de 59,39 % est le plus important de tous, ensuite viennent les facteurs F2 et F3 avec respectivement 20,99 % et 19,61 % de variance exprimée. Le cumul de variances est de 80,38 % pour les deux premiers facteurs (F1- F2). Les deux premiers facteurs totalisent donc plus de 80 % de variance totale exprimée. Ces axes factoriels retenus pour cette analyse statistique sont donc représentatifs de la variance de l'ensemble des données. De ce fait, notre analyse a porté uniquement sur les facteurs F1 et F2. Le premier plan factoriel s'est révélé suffisant pour traduire l'essentiel de cette inertie et les graphiques issus de l'analyse factorielle sont représentés par les **Figures 4 et 5**. Le premier graphique particulier à la méthode est le cercle des corrélations (**Figure 4**). Il correspond à une projection des variables initiales sur un plan à deux dimensions constituées par les deux premiers facteurs (F1-F2). Lorsque deux variables sont loin du centre du graphique, alors :

- ✓ elles sont positivement corrélées si elles sont proches les unes par rapport aux autres ;
- ✓ elles sont non-corrélées si elles sont orthogonales les unes par rapport aux autres ;
- ✓ elles sont négativement corrélées si elles sont symétriquement opposées par rapport au centre du graphique.

L'axe F1 exprime 59,39 % de la variance et exprime une corrélation entre le cuivre, le fer, l'aluminium, le manganèse et l'indice de Ryznar. L'axe F2 exprime 20,99 % de la variance et exprime une corrélation entre le calcium, le sodium, le potassium et l'arsenic. L'analyse de la **Figure 5** permet de déterminer trois types d'eaux :

- ✓ le forage 1 de Tanlili est riche en cuivre, fer, aluminium, manganèse et l'eau de ce forage se classe parmi les eaux corrosives ;
- ✓ le forage 2 de Tanlili est riche en arsenic, calcium, potassium, sodium et les eaux de ce forage sont considérées comme corrosives. Cette eau est impropre à la consommation due essentiellement à la teneur élevée à l'arsenic ;

- ✓ les forages 1 et 2 de Lilgomdé sont riches en magnésium et en sulfate, et appartiennent aux eaux douces compte tenu de la valeur faible de la dureté totale (axe F2). Ces deux forages appartiennent aussi eaux minéralisées compte tenu de la conductivité électrique.

L'Analyse en Composantes Principales a donné des indications sur l'origine de la minéralisation des eaux souterraines de la région. Celle-ci révèle que la minéralisation des eaux souterraines est contrôlée par la nature des formations géologiques présentes dans la région. En effet, l'origine des ions dans les eaux souterraines est contrôlée par le contact eau-roche. La géologie de la région est dominée par des roches volcano-sédimentaires et plutoniques, des roches granitiques et alcanino-granitiques et de l'arsénopyrite. Les ions calcium présents dans les eaux de cette localité sont issus de l'altération des roches et de l'hydrolyse des minéraux silicatés. Le rapport Mg^{2+}/Ca^{2+} des eaux des forages varie entre 0,10 et 0,86 à l'exception de Lilgomdé 1 qui a un rapport de 1,6, ce qui reste pour l'ensemble des forages inférieur à 1. Cela indique que les ions Mg^{2+} sont issus de la décomposition des minéraux ferro-magnésiens dans les roches de la région [29]. Les teneurs en chlorures et sulfates sont habituellement faibles dans les réservoirs du socle cristallin de l'Afrique de l'Ouest [30]. Dans la zone d'étude, l'origine du fer dans l'eau est essentiellement liée à la nature des formations géologiques. En effet, cet élément se retrouve dans les eaux souterraines après altération de la roche mère. La teneur importante de l'arsenic dans les eaux souterraines est généralement liée à la nature géologique du sol faite en partie de minéralisation aurifère et de roches volcano-sédimentaires du Birrimien [31]. Ces sols renferment des minerais tels que l'arsénopyrite dont la proportion en élément arsenic est relativement élevée.

Tableau 5 : Valeurs propres et pourcentages exprimés pour les axes principaux

	F1	F2	F3
Valeur propre	13,066	4,619	4,315
Variabilité (%)	59,393	20,995	19,613
% cumulé	59,393	80,387	100,000

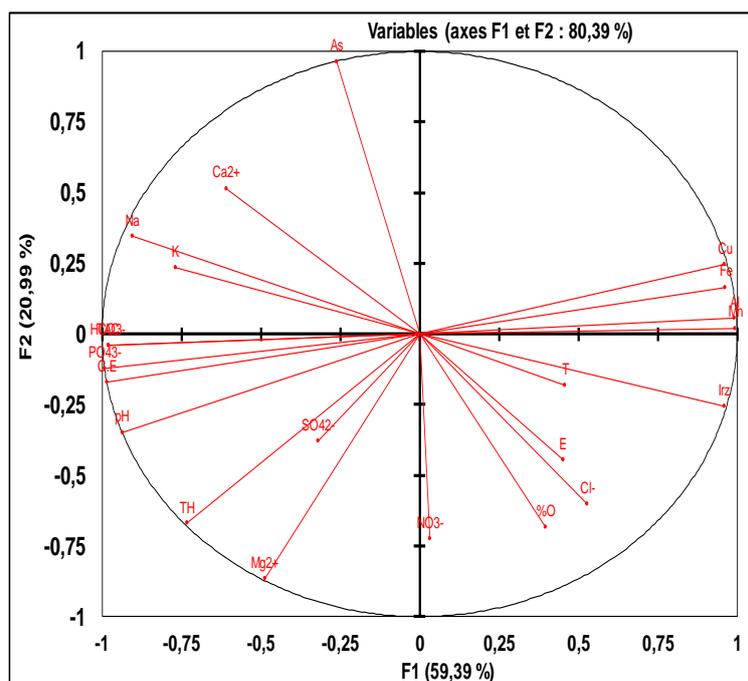


Figure 4 : Représentation des variables sur le plan factoriel F1 et F2

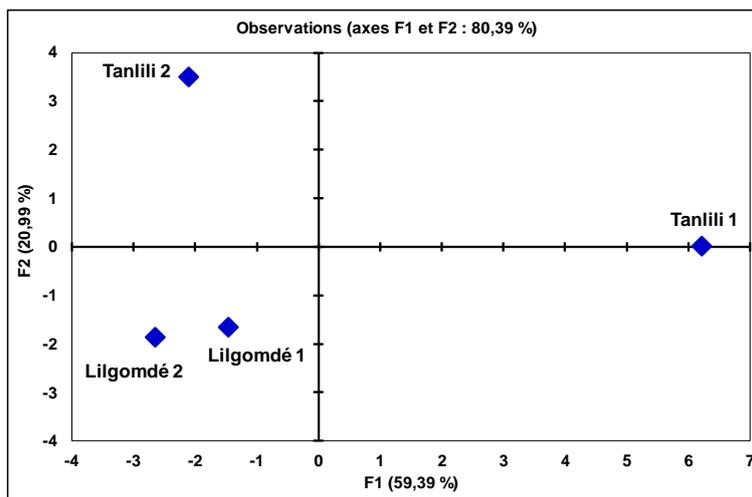


Figure 5 : Représentation des puits de prélèvement sur le plan factoriel F1 et F2

4. Conclusion

Dans cette étude, nous avons analysé les paramètres physico-chimiques et quelques teneurs de certains éléments chimiques des eaux des forages des localités de Tanlili et Lilgomdé en vue d'évaluer la potabilité de ces eaux. Les pH enregistrés ont une moyenne de $6,6 \pm 0,6$; $7,8 \pm 0,2$; $7,4 \pm 0,4$ et $7,7 \pm 0,4$ respectivement pour Tanlili 1, Tanlili 2, Lilgomdé 1 et Lilgomdé 2. Les valeurs de la conductivité électrique obtenues varient d'une part entre $64 \mu\text{S}/\text{cm}$ et $386 \mu\text{S}/\text{cm}$ pour les forages de Tanlili et d'autre part entre $290 \mu\text{S}/\text{cm}$ et $465 \mu\text{S}/\text{cm}$ pour les forages de Lilgomdé. Les duretés totales des échantillons d'eaux analysées ont des valeurs moyennes autour de $3,4 \pm 1,3$ et $4,9 \pm 0,7$ °F respectivement pour Tanlili 1 et Tanlili 2 et autour de $6,3 \pm 0,2$ et $7,6 \pm 0,1$ °F respectivement pour Lilgomdé 1 et Lilgomdé 2. Les indices de Ryznar, de Langelier et de Leroy permettent de confirmer la corrosivité et l'agressivité des eaux de Tanlili et Lilgomdé. Les teneurs moyennes en arsenic total de ces eaux sont de $0,10 \pm 0,01 \text{ mg} / \text{L}$; $0,13 \pm 0,01 \text{ mg} / \text{L}$; $0,24 \pm 0,05 \text{ mg} / \text{L}$ et $1,99 \pm 0,06 \text{ mg} / \text{L}$ respectivement pour Lilgomdé 1, Lilgomdé 2, Tanlili 1 et Tanlili 2. La teneur de l'arsenic dans ces eaux souterraines est liée à la nature géologique du sol faite en partie de minéralisation aurifère et de roches volcano-sédimentaires du Birrimien. Ces sols renferment des minerais tels que l'arsénopyrite dont la proportion en élément arsenic est relativement élevée. Le digramme de Piper a permis de montrer que les eaux de ces deux localités sont bicarbonatées calciques et magnésiennes avec une faible empreinte bicarbonaté sodique et potassique. Cette étude a révélé que les eaux des deux localités ne sont pas conseillées à la consommation humaine due la teneur élevée en arsenic. L'Analyse en Composantes Principales a donné des indications sur l'origine de la minéralisation des eaux souterraines de la région. Elle révèle que la minéralisation des eaux souterraines est contrôlée par la nature des formations géologiques présentes dans la région.

Remerciements

Les Auteurs souhaitent exprimer leur gratitude aux projets ARES-CCD / PIC et International Science Programme (ISP / IPICS), Uppsala, Sweden pour le soutien financier apporté qui a permis de réaliser ce travail.

Références

- [1] - J. C. NNAJI and S. OMOTUGBA, *International Research Journal of Pure & Applied Chemistry*, 4 (4) (2014) 437 - 446
- [2] - F. BOUCHEMAL, N. BOUCHAHM, S. ACHOUR, *Revue des sciences fondamentales et appliquées*, 3 (1) (2011) 34 - 44
- [3] - Y. MABROUKI, A. F. TAYBI, H. BENSAAAD, A. BERRAHOU, *J. Mater. Environ. Sci.*, 7, (1) (2016) 231 - 243
- [4] - B. RAHELI-NAMIN, S. MORTAZAVI, M. MOBINIFAR, M. ADELI, *J. Mater. Environ. Sci.*, 7 (1) (2016) 259 - 271
- [5] - OMS, *Directives de qualité pour l'eau de boisson. Quatrième édition. Publication Organisation Mondiale de la Santé. Genève, Suisse*, (2011) 307 - 447
- [6] - M. LAGNIKA, M. IBIKOUNLE, J-P. C. MONTCHO, V. D. WOTTO, N. G. SAKITI, *Journal of Applied Biosciences*, 79 (2014) 6887 - 6897
- [7] - T. K. YAO, M. OGA, O. FOUCHÉ, D. BAKA and C. P. J. BIEMI, *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 6 (2012) 7069 - 7086
- [8] - M. L. BELGHITI, A. CHAHLAOUI, D. BENGOUNI and EI R. MOUSTAINE, *Sci. en Lib.*, 5 (2013) 21 - 36
- [9] - S. GUERGAZI, K. YAHIAOUI, D. AMIMEUR and S. ACHOUR, *J. Mater. Environ. Sci.*, 5 (2014) 2354 - 2358
- [10] - S. GUERGAZI and S. ACHOUR, *Larhyss Journal*, 04 (2005) 119 - 127
- [11] - H. ALAYAT and C. LAMOUREUX, *Coastal Zone Processes and Management. Environmental Legislation*, (2007) 75 - 84
- [12] - P.L. SMEDLEY, J. KNUDSEN, D. MAIGA, *Applied Geochemistry*, 22 (2007) 1074 - 1092
- [13] - R. SIMLER, Diagramme 5.6. Logiciel Libre du Laboratoire d'Hydrogéologie. Université d'Avignon, France, (2007)
- [14] - A. M. KOUASSI, A. MAMADOU, K. E. AHOUSI and J. BIEMI, *Rev. Ivoir. Sci. Technol.*, 22 (2013) 138 - 166
- [15] - N. AKA, S. B. BAMBA, G. SORO and N. SORO, *Larhyss Journal*, 16 (2013) 3 - 52
- [16] - A. AYOUBA and B. GUEL, *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 9 (2015) 517 - 533
- [17] - L. BOUGARNE, EI. BOUCHAMMA, M. BEN ABOU and H. BOUKA, *J. Mater. Environ. Sci.*, 8 (7) (2017) 2296 - 2301
- [18] - E. DERWICH, L. BENAABIDATE, A. ZIAN, O. SADKI, D. BELGHITY, *Larhyss Journal*, 8 (2010) 101 - 112
- [19] - M. M. TFEILA, M. O. S. A. OULED KANKOU, S. SOUABI, M. A. ABOULHASSAN, A. TALEB, M. BOUEZMARNI, *J. Mater. Environ. Sci.*, 7 (1) (2016) 148 - 160
- [20] - A. TOUMI, A. REGGAM, H. ALAYAT, M. HOUHAMDI, *J. Mater. Environ. Sci.*, 7 (1) (2016) 139 - 147
- [21] - B. LOUKMAN, S. NAKOLEDOUSSE, A. MAHAMAT NOUR and M. NGUINAMBAYE MEMTI, *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, 11 (3) (2017) 1336 - 1349
- [22] - N. TABOUCHE and S. ACHOUR, *Larhyss Journal*, 03 (2004) 99 - 113
- [23] - D. GHAZALI, A. N. ZAID, *Science Lib. Editions Mersenne*, 4 (2012) 2111 - 4706
- [24] - S. MOR, K. RAVINDRA, R. P. DAHIYA and A. CHANDRA, *Environmental Monitoring and Assessment*, 118 (2006) 435 - 456
- [25] - A. K. ALEMAD, H. SAADAoui, N. AIT SAID, M. NAJY, H. DAIFI, H. SALEH ALI YAHYA, A. OUTHMAN, I. MARC, S. ABOUBAKER, I. BELHAILI, Y. IDRISSE AZAMI, K. EL KHARRIM, D. BELGHYTI, *J. Mater. Environ. Sci.*, 7 (1) (2016) 161 - 169
- [26] - M. G. BIYOUANE, A. ATBIR, H. BARI, E. MONGACH, A. KHADIR, L. HASSNAOUI, L. BOUKBIR, M. EI HADEK, *Mater. Environ. Sci.*, 5 (2014) 2359 - 2364
- [27] - H. AMADOU, M. S. LAOUALI, A. S. MANZOLA, *J. Appl. Biosci.*, 8 (2014) 1904 - 1916
- [28] - E. O. MOHAMEDOU, A. LEBKIRI, E. H. RIFI, M. LEBKIRI, M. FADLI, M. PONTIÉ, A. K. OULD MAHMOUD and M. L. FAGEL, *Afrique SCIENCE*, 4 (3) (2008) 394 - 409
- [29] - K. E. AHOUSI, Y. B. KOFFI, A. M. KOUASSI, G. SORO, and N. SORO, *Afrique SCIENCE*, 08 (3) (2012) 51 - 68
- [30] - Y. TRAVI, J. MUDRY, *Revue d'Hydrogéologie*, 1 (1997) 13 - 21
- [31] - A. K. SAKIRA, "Contribution au développement d'électrodes miniaturisées pour le dosage de métaux lourds à l'état de trace dans les eaux de consommation", Thèse de l'Université Ouaga I Pr Joseph KI-ZERBO, (2016) 205 p.