

Étude hydrochimique et microbiologique des eaux de source de l'ouest montagneux de la Côte d'Ivoire : Cas du village de Mangouin-Yrongouin (sous-préfecture de Biankouman).

¹AHOUSSEI Kouassi Ernest*, ¹KOFFI Yao Blaise, ²KOUASSI Amani Michel, ¹SORO Gbombélé, ¹BIEMI Jean

¹. Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement (LSTEE), Unité de Formation et de Recherche (UFR) des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STRM), Université Félix Houphouët Boigny, Cocody-Abidjan, 22 BP 582 Abidjan 22 ; Tel : (+225) 22 48 38 03 (Côte d'Ivoire)

². Département des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STeRMi), Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny (INP HB), BP 1093 Yamoussoukro (Côte d'Ivoire), Tél. (225) 30 64 67 15 ; E-mail : michel.a_kouassi@yahoo.fr

*Correspondance et tirés à part : ahoussi@gmx.fr

Original submitted in on 10th January 2013. Published online at www.m.elewa.org on 30th March 2013.

RÉSUMÉ

Objectif : Évaluer la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux de source du village de Mangouin-Yrongouin dans la localité de Biankouman (Côte d'Ivoire).

Méthodologie et résultats : Pour la réalisation de cette étude, la méthode utilisée repose sur des relevés piézométriques de la nappe phréatique, des analyses physico-chimiques et microbiologiques des eaux. Les résultats issus de ces analyses ont été traités à l'aide de techniques hydrochimiques (diagramme de Piper). L'analyse statistique multivariée dont l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) a également été utilisée pour la mise en évidence des phénomènes de minéralisation des eaux de ladite localité. L'étude piézométrique montre que le niveau statique de la nappe phréatique varie de 0,48 m à 4,52 m, avec une moyenne de 1,24 m. Les eaux sont acides, avec un pH qui varie de 4,85 à 6,01. Elles sont faiblement minéralisées, avec une conductivité électrique moyenne de 152,90 µS/cm. Dans la zone d'étude, les eaux sont chlorurées calciques. Les analyses chimiques révèlent que les eaux de Mangouin-Yrongouin sont dépourvues d'iode. L'analyse des métaux lourds montre qu'en dehors du fer et du Ni qui présentent des teneurs supérieures à la valeur guide OMS qui est respectivement de 0,3 mg/L et 0,07 mg/L, les autres métaux étudiés sont pratiquement inexistantes dans les eaux. Sur le plan microbiologique, les eaux de source contiennent de forts taux d'*Escherichia coli* (400 à 500 ufc/100 ml) et de *Clostridium perfringens* (100 ufc/20 ml à 1500 ufc/20 ml). La minéralisation des eaux est contrôlée par les phénomènes tels que le pluviollessivage des sols, l'hydrolyse acide des roches et l'apport lié aux activités anthropiques.

Conclusion et applications : Cette étude montre que les ressources en eau de Mangouin-Yrongouin sont soumises à une pression anthropique importante. La consommation de ces eaux en dehors de tout traitement présente des risques sanitaires pour les populations.

Mot clés : Assainissement, eaux de source, pollution, Hydrochimie, Environnement, Éléments Traces Métalliques.

INTRODUCTION

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 des populations urbaines et rurales. Cette grande pression démographique sur les ressources naturelles se traduit par une production de plus en plus importante de déchets de toute nature. Ainsi, depuis ces dernières décennies, les études réalisées sur les ressources en eau de la Côte d'Ivoire par Ahoussi et al. (2008, 2009, 2010 et 2012a), Coulibaly et al. (2008) et Soro et al. (2010) ont signalé de nombreux foyers de pollution aussi bien au niveau des eaux de surface que des eaux souterraines, dans les localités d'Abidjan, de Kossihouen et de N'zianouan. Le village de Mangouin-Yrongouin situé dans le département de Biankouman n'est pas en marge de ces problèmes environnementaux. Ladite localité objet de cette étude est défavorisée par l'inexistence d'un système d'assainissement adéquat. On y observe par endroits la présence de tas d'ordures à plusieurs endroits. Les effluents de cette localité sont généralement déversés dans la nature. Les

populations suite aux manquantes de toilettes font leur besoins dans la nature. En saison de pluies, les eaux de ruissellement, érodent les sols et transportent tous les déchets du sol ainsi les selles jusqu'aux eaux de sources. Dans ladite l'eau potable est une denrée rare. En effet, le forage d'eau d'alimentation en eau du village est en panne depuis plusieurs années. Cette situation a conduit les populations à utiliser l'eau de source comme principal point d'alimentation. La consommation de ces eaux sans traitement expose les populations à des risques sanitaires. Ainsi dans cette localité, une enquête réalisée sur le terrain lors de la réalisation de ces travaux a montré que les maladies diarrhéiques liées à l'absence d'eau potable sont récurrentes. Cette étude a été initiée pour évaluer l'influence des activités anthropiques sur la qualité des ressources en eau du village de Mangouin-Yrongouin. Elle s'appuie sur l'utilisation des données piézométriques, hydrochimiques et microbiologiques pour la caractérisation de la pollution des eaux et des phénomènes à l'origine de la dégradation de la qualité des eaux de cette localité.

PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Le village Mangouin-Yrongouin est situé dans le département de Biankouma à l'Ouest de la Côte d'Ivoire ; précisément à 32 km de la ville de Man et 13 km de Biankouma, sur l'axe routier Man-Biankouma à la longitude 07°38'23,8" Ouest et la latitude 07°38'38,4" Nord. Cette localité abrite une population estimée à 5 000 habitants. Cette population est constituée en majorité de Yacouba, Mahouka ; Toura, et les Senoufo en ce qui concerne les autochtones et de Guinéens, Burkinabés et Maliens pour les allogènes. Le village de Mangouin-Yrongouin qui appartient à la région de Man tire son originalité par un paysage de montagne à altitude élevée, dépassant 1000 mètres. Le massif de Man est plus étalé et le moins élevé. Il est constitué d'une succession d'inselbergs séparés par des vallées

profondes et s'étend sur plus d'une centaine de kilomètres d'Est en Ouest. Le massif de Man est formé de deux grands blocs de parts et d'autres de l'incision de la vallée du N'zo: (i) les monts Toura à l'Est qui sont nus ; et (ii) les monts Dan à l'Ouest couverts par la forêt. L'ensemble du massif de Man présente des altitudes variant de 500 à plus de 1000 mètres et des pentes fortes. Ailleurs, des pointements moins hauts sont remarquables par leurs formes beaucoup plus agressives, où l'on reconnaît de véritables pics plus au moins déchiquetés telle la dent de Man (881 mètres). L'aspect de ce relief fait de Man la région la plus « accidentée » du pays.

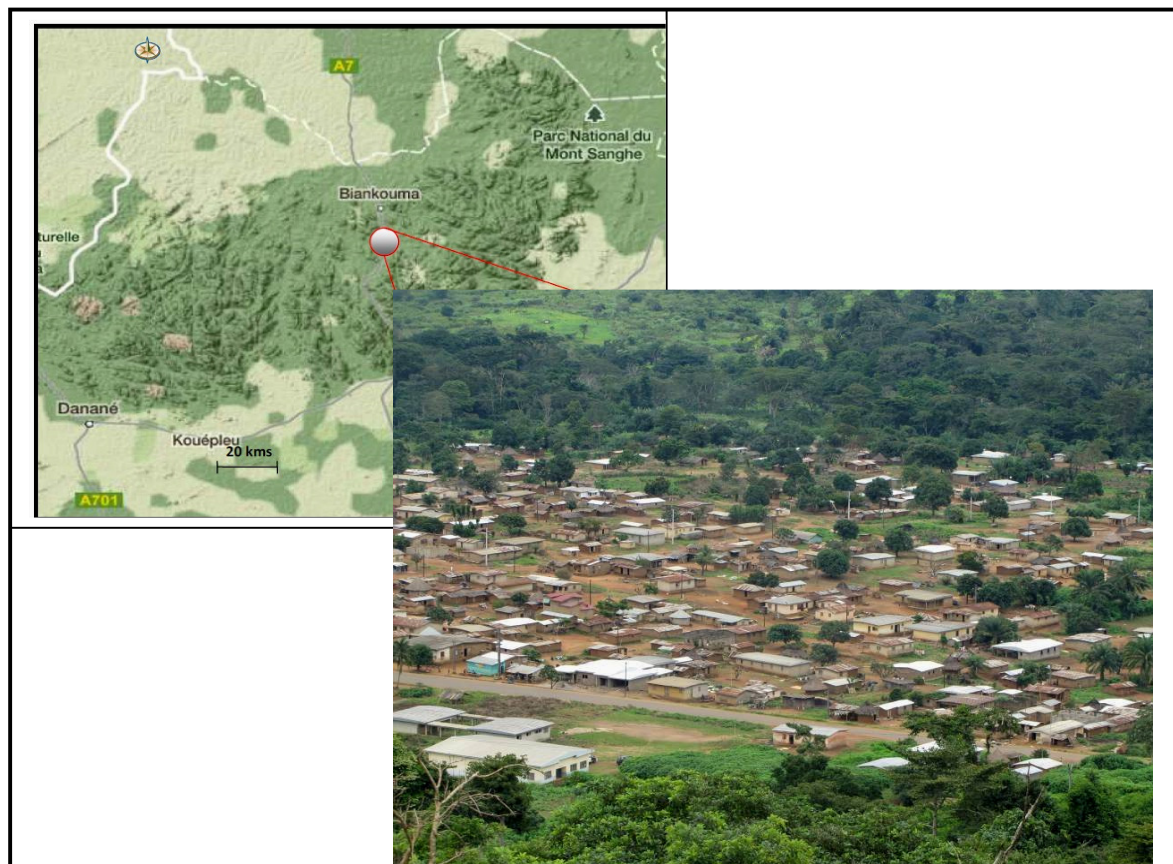


Figure 1. Localisation géographique du village de Mangouin-Yrongouin

Cadre géologique de la localité de la zone d'étude : La localité de Mangouin-Yrongouin appartient à la région de Man-Blancouma qui est située dans le domaine libérien de la dorsale de Man (Figure 2). Cette dorsale se poursuit vers l'Est par des formations archéennes du Libéria et de la Sierra Leone. Elle est limitée dans sa partie orientale par la faille du Sassandra, frontière entre les domaines libériens et éburnéens. Les études minéralogiques, métamorphiques et géochronologiques entreprises par Kouamélan (1996) ont permis d'établir l'histoire évolutive de la région. Sur le plan lithologique, trois domaines ont été identifiés. Il s'agit du domaine granulite Nord; du domaine granulite et magmatique intermédiaire; du domaine Sud des gneiss migmatitiques à biotite. La figure 2 montre les principales unités géologiques de la région de Blancouman et de ses environs. Les travaux de Camil et al. (1984) ont permis de recenser dans

l'ordre chronologique les différentes unités lithologiques constituées d'un ensemble de gneiss gris. Il est d'un aspect rubanné et d'origine magmatique; un ensemble de quartzites à magnétites: il est essentiellement d'origine sédimentaire et comportant diverses formations associées (diopsidites et hypersthinites); les charnockites intrusives : très développées dans le compartiment Nord. Du point de vue structural, la faille du Sassandra, limite entre le domaine libérien et éburnéen est identifiée selon des études de Djro (1998), comme étant une succession des phases tectoniques, séparées par des périodes de "calme" relatif. Il identifie quatre phases de déformation accompagnées chacune d'un degré de métamorphisme différent: une première phase qui est un aplatissement ; un cisaillement ductile, dextre de direction N160; une transgression et un cisaillement fragile.

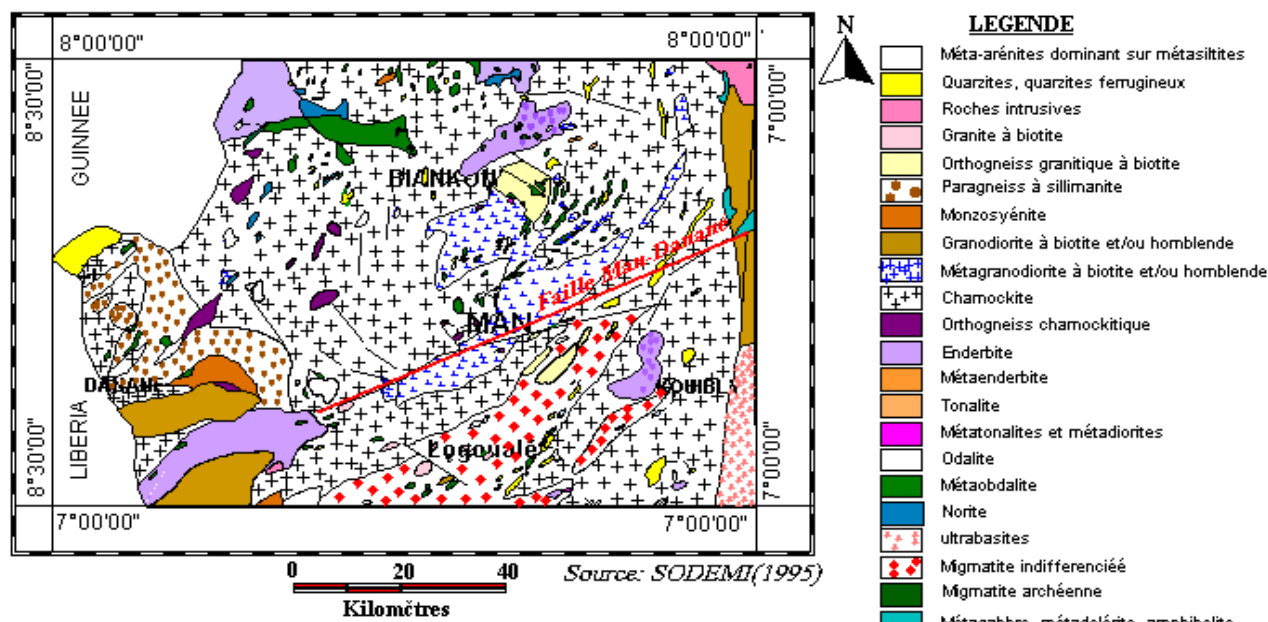


Figure 2 : Carte géologique de la région de Man-Biankouman (Saley, 2003)

Cadre hydrogéologique et pédologique de Mangouin-Yrongouin : Dans la zone d'étude, les aquifères qui s'y trouvent se composent de trois réservoirs superposés. En haut, se trouve les altérites qui sont composées de cuirasse latéritique, d'argile, d'arène lorsque les formations géologiques sont de type granitoïde. La zone du milieu est formée d'éléments rocheux et de produits d'altération, avec la présence ou non de nombreuses fissures. Cette zone, lorsqu'elle contient de l'eau, constitue le principal réservoir de l'aquifère de socle. Le troisième réservoir se situe dans le socle fracturé et est parcouru par de simples fractures ou dans certains cas par des zones broyées dues à des contraintes locales assez fortes. Ce réservoir de socle est souvent le siège de circulation d'eau souterraine. Les trois réservoirs sont en fait considérés comme un système aquifère bicouche formé d'un réservoir semi-perméable capacitif (les altérites) surmontant un réservoir, formé de roche fissurée, captif à fonction essentiellement conductrice. L'aquifère des altérites possède une porosité totale très élevée mais une porosité efficace très faible engendrant des perméabilités faibles sauf pour les parties superficielles fortement lessivées. Ces aquifères sont captés dans le village par des puits fournissant des débits d'exploitation et des

débits spécifiques faibles. La qualité de l'eau est médiocre à cause des nombreux minéraux argileux et du risque de pollution des eaux depuis la surface. Cependant, les ressources en eau de la nappe phréatique sont très variables à cause de la variabilité verticale et latérale des caractéristiques hydrogéologiques essentielles. Ces aquifères reçoivent directement les eaux des précipitations et leurs niveaux piézométriques baissent considérablement en saison sèche et remontent en saison de pluie (Biémi, 1992). La nappe phréatique est plus facilement accessible à travers les puits modernes, les puits traditionnels ou les puisards temporaires creusés dans les bas-fonds pendant la saison sèche. Malgré une pluviométrie importante, l'environnement fait que le coefficient de ruissellement est très élevé. Les sols rencontrés dans cette région sont de types ferralitiques. Compte tenu du caractère très accidenté de la zone, ces sols ont subi un lessivage intense, suite à l'importante pluviométrie de la région (3000 mm à Danané, 2000 mm à Man et environs). Les sols à valeur agronomique moyenne constituent 12% des sols de la zone d'étude. Les sols riches et profonds, de texture argileuse qui convient à la culture du cacao, ne représentent que 5% des sols.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Méthode d'étude piézométrique : Une campagne de relevés piézométriques a été organisée en août 2012 dans le village de Mangouin-Yrongouin pour la mesure du niveau statique de la nappe phréatique dans les différents puits villageois. Cette étude a démarré par le repérage de tous les puits du village à partir d'un appareil GPS (Global Positioning System). Les mesures piézométriques ont été réalisées à l'aide d'une sonde piézométrique OTT (100 m) sonore et lumineuse. Les données collectées sur le terrain ont permis de déterminer la côte des eaux souterraines selon la formule suivante :

$$C_{\text{eau}} = Z - H \quad (1)$$

avec Z : altitude du piézomètre (m) ;
H = (NP + M) : profondeur de l'eau dans le piézomètre (m) ;
NP : niveau piézométrique (m) ;
M : margelle des puits ;
C_{eau} : côte de l'eau (m).

Pendant la campagne de relevés piézométriques, la profondeur des puits a également été mesurée. La lame

d'eau dans le puits a été déterminée par la formule suivante :

$$L_{\text{eau}} = \text{Prof (puits)} - \text{NP} \quad (2)$$

avec L_{eau} : lame d'eau en (m) ;
Prof (puits) : profondeur du puits en (m) ;

Méthode d'étude hydrochimique et microbiologique

Méthode d'échantillonnage : L'échantillonnage des eaux du village de Mangouin-Yrongouin a été effectué en août 2012 pendant la petite saison sèche. Il a porté sur les eaux de sources, les eaux de puits et les eaux de surface. Dans la zone d'étude, nous avons identifié six (6) sources d'eau dont trois (3) sources d'eau pérennes qui se situent dans les environs immédiats du village. Parmi celles-ci, trois sont utilisées par la population du village pour les besoins en eau potable (**Figure 3 et 4**) en remplacement de l'eau courante. En plus des sources d'eau utilisées pour l'alimentation en eau, les populations s'alimentent également à partir des puits. Les eaux de puits sont généralement utilisées pour la lessive, la vaisselle et pour la boisson



Figure 3 : Site d'alimentation en eau principale de la population de Mangouin pour ses besoins domestiques



Figure 4 : Site d'approvisionnement en eau potable de la population d'Yrongouin

Lors de cette campagne, les échantillons d'eau prélevés ont été mis dans des bouteilles en polyéthylène de capacité 500 ml et 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 dans l'heure qui suit le prélèvement. Lors des prélèvements, les paramètres physiques des eaux tels que le pH, la conductivité électrique (CE) et le potentiel d'oxydoréduction (Eh) ont été mesurés *in situ*. L'appareillage utilisé sur le terrain est constitué d'un pH-mètre Star 4 pour la mesure du pH et Eh, d'un conductimètre Hach Sension 5 pour la mesure de la conductivité électrique (CE) et de la salinité (Sal.) Les eaux prélevées ont fait l'objet de plusieurs analyses dont les analyses physico-chimiques et microbiologiques. Les éléments chimiques dosés sont : calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), sodium (Na^+), potassium (K^+), chlorure (Cl^-), sulfate (SO_4^{2-}) et bicarbonate (HCO_3^-), pour ions majeurs et nitrate (NO_3^-), nitrite (NO_2^-), ammonium (NH_4^+), phosphate (PO_4^{3-}) pour les sels nutritifs. Les métaux tels que cuivre (Cu), plomb (Pb), chrome (Cr) et arsenic (As) ont également fait l'objet d'analyse. Aussi, la Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours (DBO_5), la Demande Chimique en Oxygène (DCO) et l'iode des eaux ont-elles été également mesurées. Les échantillons

d'eau pour analyse microbiologique ont été prélevés dans des bouteilles de 500 ml, préalablement stérilisées et conservés dans une glacière à 4°C. Les analyses microbiologiques ont concerné les bactéries telles qu'*Escherichia coli*, *Clostridium Perfringens* et les coliformes totaux. Les échantillons d'eau ont été prélevés sur les principaux points d'eau du village. Il s'agit des eaux de sources, du lac de la société GRANOCL et des puits du village.

Méthode d'analyse et de traitement des données : Au laboratoire, les cations majeurs, ont été dosés par la méthode de spectrophotométrie à l'aide d'un spectrophotomètre de type AAS VARIAN. Les sels nutritifs ont été analysés à partir de la méthode de spectrophotométrie par un spectrophotomètre de type UV SHIMADZU. Les bicarbonates ont été dosés à partir de la méthode de dosage à l'aide d'un titrateur digital. Les chlorures ont été mesurés par la méthode de Mohr par titrage. Les sulfates, la DCO ont été dosés par spectrophotométrie à l'aide d'un spectrophotomètre HACH DR 2010. La DBO_5 a été dosée par incubation à partir d'un incubateur de type HACH. La turbidité des eaux a été mesurée à partir d'un turbidimètre 2020. Les métaux ont été dosés par spectrométrie à l'aide d'un spectrophotomètre à absorption atomique VARIAN. Les analyses microbiologiques ont nécessité l'utilisation de méthodes selon les microorganismes recherchés. Ainsi, pour le dénombrement des coliformes totaux, nous avons fait appel à la méthode NF V08-50 et pour le

dénombrement des coliformes fécaux de type *Escherichia*, la méthode AFNOR BRD 07/1-07/93 a été utilisée. Les données collectées sur le terrain et au laboratoire ont été traitées à partir des méthodes statistiques multivariées couplées aux méthodes hydrochimiques. La méthode hydrochimique a nécessité l'utilisation du diagramme de Piper pour la classification hydrochimique des eaux. Ce diagramme est très fréquemment utilisé dans le domaine de hydrochimie, avec de très bons résultats, par Kouzana et al. (2007), Oga et al. (2009), Ahoussi et al. (2010, 2012b). L'approche statistique est basée sur l'utilisation de l'Analyse en Composantes Principale (ACP) et la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) pour l'étude des phénomènes à l'origine de la minéralisation

des eaux. Ces deux méthodes statistiques sont couramment utilisées dans le domaine des sciences de l'eau, avec d'excellents résultats dans l'étude de l'origine des minéralisations des eaux, par les auteurs tels Güler et al. (2002) ; Yidana (2008) ; Ahoussi et al. (2012a) ; Thilagavathi et al. (2012). Les analyses ont été effectuées à partir de 21 variables qui sont : pH, Turbidité (Turb), Eh, Sal., CE, HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl⁻, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , Fe, Mn, Pb, Cu, Cr et Pb. Les analyses statistiques ont été réalisées sous le logiciel STATISTICA 6.0. Les résultats des analyses microbiologiques ont été également comparés aux valeurs guides de l'Organisation Mondiale de Santé (OMS, 2008) dans le cadre d'une eau de boisson, non influencée par les activités anthropiques.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Résultats Hydrogéologiques : Les résultats de la campagne de relevés piézométrique sont consignés dans le tableau 1. La profondeur de la nappe phréatique varie de 0,48 m à 4,52 m, avec une moyenne de 1,24 m, ce qui montre que la nappe phréatique est peu profonde. La lame d'eau dans les puits varie de 0,29 m à 4,52 m, avec une moyenne de 1,90 m.

Résultats de l'étude physico-chimique : Les sites d'échantillonnage des eaux souterraines, des eaux de source et des eaux de surface sont présentés dans le tableau 2. Les principaux points d'eau échantillonnés font l'objet de site d'alimentation en eau pour les populations villageoises.

Résultats des mesures *in situ* : Les paramètres physiques des eaux sont consignés dans le **tableau 3**. A l'analyse de celui-ci, il ressort que les eaux sont acides,

avec un pH qui varie de 4,85 à 6,01, pour une moyenne de 5,34. La conductivité électrique des eaux source du village varie de 112,30 à 178,20 $\mu\text{S/cm}$, avec une moyenne de 152,90 $\mu\text{S/cm}$. Ces eaux sont faiblement minéralisées. Dans la zone, les conductivités sont graduelles, elles évoluent respectivement de 62,9 $\mu\text{S/cm}$ pour l'eau du lac (eau de surface) à 304 $\mu\text{S/cm}$ pour l'eau de puits. Les puits présentent les conductivités les plus élevées. Les eaux de source ont une turbidité qui varie de 0,98 à 10,01 NTU, avec une moyenne de 4,08 NTU. Les eaux ont un potentiel d'oxydoréduction positif qui varie de 35 mv à 100 mv, avec une moyenne de 73 mv. La DCO varie de 58 à 80 mg/L (moyenne 72 mg/L). Quant au DBO_5 , elle varie de 23 mg/L à 38 mg/L, avec une moyenne de 31 mg/L.

Tableau 1 : Récapitulatif des données piézométriques et des caractéristiques des ouvrages hydrauliques

N°	Site	Ouvrage	Latitude	Longitude	Alt. (m)	Niv. Eau	Prof (m)	Côte Eau (m)	Lame d'eau (m)
1	Mangouin	Puits	07°39'13,9"N	07°49'17,5"W	581	3,87	6,05	577,13	2,18
2	Mangouin	Puits	07°38'38,4"N	07°38'23,8"W	587	12,1	13,98	574,9	1,88
3	Mangouin	Puits	07°38'35,5"N	07°36'23,1"W	581	5,58	10,1	575,42	4,52
4	Mangouin	puits	07°38'34,5"N	07°36'21,8"W	580	7,01	7,51	572,99	0,5
5	Mangouin	Puits	07°38'33,2"N	07°36'20,7"W	578	6,25	8,97	571,75	2,72
6	Mangouin	Source de Gahiba N°5	07°38'29,2"N	07°36'20,2"W	567	-	-	-	-
7	Mangouin	Source N°6	07°38'26,30"N	07°36'22,5"W	572	-	-	-	-
8	Mangouin	Puits	07°38'26,30"N	07°36'24,8"W	582	8,19	10,37	573,81	2,18
9	Mangouin	Puits	07°38'27,8"N	07°36'26,7"W	586	7,51	9,72	578,49	2,21
10	Mangouin	Puits	07°38'26,6"N	07°36'27,8"W	586	7,88	8,17	578,12	0,29
11	Mangouin	Puits	07°38'30,1"N	07°36'28,8"W	590	8,48	8,85	581,52	0,37
12	Mangouin	Puits	07°38'32,5"N	07°36'29"W	591	6,33	8,43	584,67	2,1

Tableau 2. Sites de prélèvement des eaux de Mangouin-Yrongouin

N°	Sites de prélèvement	Ouvrages	Latitude	Longitude	Alt. (m)	Lame d'eau (m)
E1	Mangouin	Source 1	07°38'43,3"N	07°36'33,35"W	579	Prise d'eau principale du village : eau utilisée pour la boisson
E2	Mangouin	Lac : eau de surface	07°38'38,9"N	07°36'34,3"W	571	Lac de Granoci : eau de surface. Non utilisée pour les besoins des populations. Ecoulement N-S
E3	Mangouin	Source 2	07°38'50,8"N	07°36'22"W	569	Eau de source clôturée et utilisée pour l'AEP
E4	Mangouin	Puits	07°38'26,30"N	07°36'24,8"W	582	Près de la cours du chef de village
E5	Yrongouin	Source 4	07°38'26,3"N	07°36'22,5"W	572	Source à usage domestique, mal entretenue avec présence d'algue, eau stagnante

Tableau 3. Récapitulatif des mesures des paramètres physiques et chimiques des eaux de source de Mangouin-Yrongouin

Paramètres physico-chimiques	Valeur Guide OMS (2008)	Moyenne	Min	Max
Paramètres physiques				
pH	6-8,5	5,34	4,85	6,01
Eh(mv)	-	73,20	35,40	100,00
Cond (µS)	-	152,90	112,30	178,20
Sal %	-	0,00	0,00	0,00
Turb (NTU)	-	4,08	0,98	10,01
DCO (mg/L)	-	72,00	58,00	80,00
DBO ₅ (mg/L)	-	31,00	23,00	38,00
Paramètres chimiques en mg/L				
HCO ₃ ⁻	-	68,77	53,70	80,00
Cl ⁻	250	234,00	187,00	270,00
SO ₄ ²⁻	-	35,07	30,49	39,02
NH ₄ ⁺	-	0,00	0,00	0,00
PO ₄ ³⁻	-	0,05	0,05	0,05
NO ₃ ⁻	50	0,04	0,03	0,07
NO ₂ ⁻	-	0,01	0,00	0,02
K ⁺	-	35,33	29,46	45,12
Na ⁺	200	32,63	26,32	45,21
Ca ²⁺	-	89,87	68,48	102,00
Mg ²⁺	-	18,33	14,50	21,00
Les métaux en mg/L				
I	-	ND	ND	ND
Fe	0,3	0,54	0,24	0,76
Mn	0,5	0,05	0,00	0,10
Pb	0,01	0,01	0,01	0,01
Cd	0,003	<0,002	<0,002	<0,002
As	0,01	<0,002	<0,002	<0,002
Cr	0,05	0,02	0,01	0,03
Ni	0,02	0,09	0,02	0,12
Hg	0,001	<0,001	<0,001	<0,001
CN	0,07	<0,001	<0,001	<0,001

ND : Non Détecté

Résultats des paramètres chimiques des eaux de source : Les cations étudiés dans les eaux de sources sont constitués des ions Na⁺, K⁺, Ca²⁺ et Mg²⁺. Parmi ceux-ci, les plus importants sont les ions Ca²⁺ qui représentent 51 % des cations étudiés après viennent les K⁺ (20%), les Na⁺ (19%) et les Mg²⁺ (10%). Au niveau des anions, les plus importants sont Cl⁻ (69%), ensuite

viennent HCO₃⁻ (20%) et SO₄²⁻ (11%). Les sels nutritifs tels que PO₄³⁻, NO₂⁻ et NO₃⁻ sont pratiquement inexistantes dans les eaux de sources. La classification hydrochimique des eaux à partir du diagramme triangulaire de Piper montre que les eaux de Mangouin-Yrongouin sont principalement des eaux chlorurées calciques (**Figure 5**).

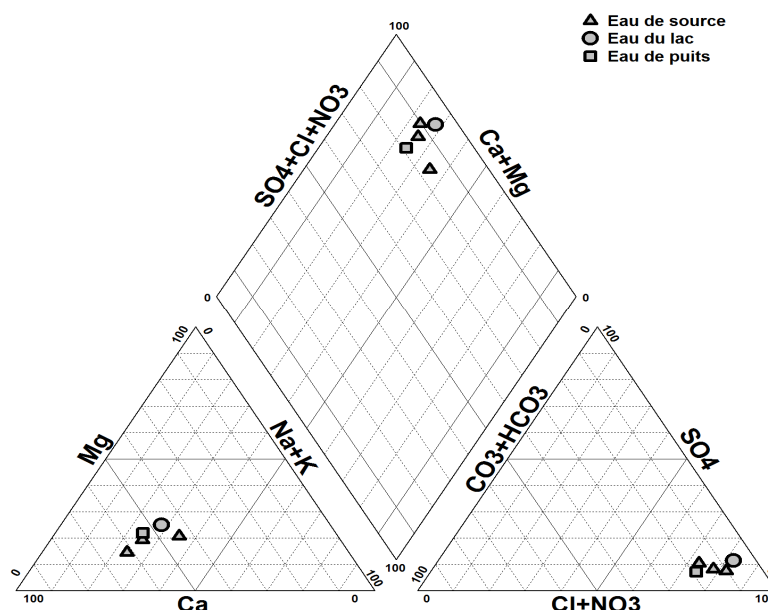


Figure 5. Classification hydrochimique des eaux de Mangouin-Yrongouin

Dans cette étude, les métaux lourds analysés sont constitués de Fe, Mn, Pb, Cd, As, Cr, Ni, Hg et I (tableau 4). Parmi les métaux étudiés, on note qu'en dehors du Fe et Ni qui présentent respectivement des teneurs de 0,76 mg/L et 0,12 mg/L, supérieures à la valeur guide de l'OMS (0,3 mg/L et 0,07 mg/L), tous les autres métaux

sont pratiquement inexistantes dans les eaux étudiées. La teneur en iode des eaux du village est largement en-dessous de la limite de détection, ce qui montre que les eaux du village de Mangouin-Yrongouin sont très pauvres en iode.

Tableau 4 : Teneurs en métaux lourds des eaux de Mangouin-Yrongouin

Les métaux en mg/L	Norme OMS	Moyenne	Min	Max
I		ND	ND	ND
Fe	0,3	0,54	0,24	0,76
Mn	0,5	0,05	0,00	0,10
Pb	0,01	0,01	0,01	0,01
Cd	0,003	<0,002	<0,002	<0,002
As	0,01	<0,002	<0,002	<0,002
Cr	0,05	0,02	0,01	0,03
Ni	0,07	0,09	0,02	0,12
Hg	0,001	<0,001	<0,001	<0,001
CN	0,07	<0,001	<0,001	<0,001

RÉSULTATS DE L'ÉTUDE STATISTIQUE MULTIVARIÉE

Analyse en Composantes Principales (ACP) : Les valeurs propres des facteurs sont présentées dans le tableau ci-dessous. Les trois premiers facteurs représentent 83,49 % de la variance exprimée (tableau

5). Ces facteurs regroupent le maximum de la variance exprimée et sont suffisants pour traduire exactement l'information recherchée. La matrice de corrélation entre les différentes variables est présentée par le tableau 6.

Tableau 5. Valeurs propres de l'ACP

Facteurs	Valeur propre	% Total de la variance exprimée	Valeur propre cumulée	Variance Cumulée
1	7,76	33,75	7,763	33,75
2	5,88	25,55	13,64	59,30
3	5,56	24,19	19,20	83,49
4	3,80	16,50	23,00	100,00

L'analyse des variables de l'ACP dans le plan factoriel F1-F2 est présentée par la figure 6. Ce graphe met en

évidence trois grands regroupements des paramètres étudiés dans les points d'eau.

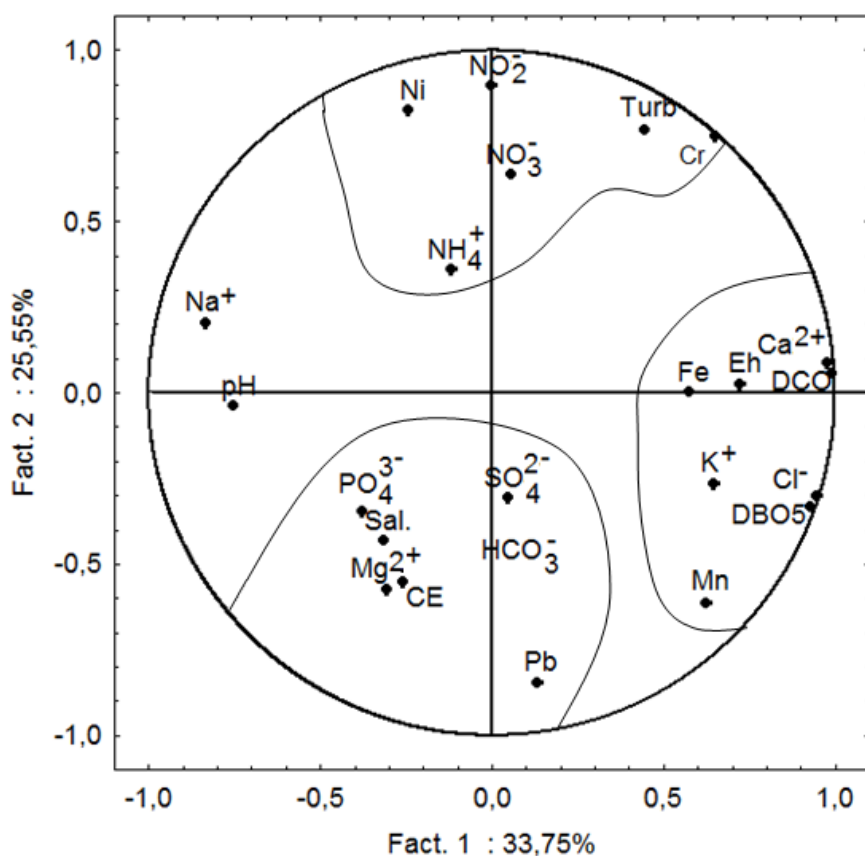


Figure 6. Analyse dans le plan factoriel F1-F2

Tableau 6 : Matrice de corrélation entre les variables

	pH	Eh	CE	Sal.	HCO ₃ ⁻	DCO	DBO ₅	Cl	Turb	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Fe	Mn	Pb	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cr	Ni
pH	1,00																						
Eh	-1,00	1,00																					
CE	-0,32	0,36	1,00																				
Sal.	-0,25	0,27	0,86	1,00																			
HCO ₃ ⁻	-0,38	0,43	0,95	0,66	1,00																		
DCO	-0,71	0,69	-0,29	-0,41	-0,13	1,00																	
DBO ₅	-0,60	0,58	-0,15	-0,22	-0,04	0,91	1,00																
Cl ⁻	-0,77	0,76	0,02	-0,07	0,13	0,91	0,97	1,00															
Turb	-0,31	0,26	-0,66	-0,37	-0,70	0,44	0,19	0,19	1,00														
SO ₄ ²⁻	0,60	-0,62	-0,58	-0,62	-0,52	0,08	0,26	0,03	-0,16	1,00													
NH ₄ ⁺	0,13	-0,10	-0,11	-0,53	0,14	0,01	-0,26	-0,25	-0,18	0,03	1,00												
PO ₄ ³⁻	0,28	-0,30	0,19	0,61	-0,11	-0,49	-0,20	-0,23	-0,06	0,01	-0,87	1,00											
NO ₃ ⁻	-0,02	-0,02	-0,51	-0,05	-0,70	0,00	-0,12	-0,13	0,86	-0,18	-0,48	0,42	1,00										
NO ₂ ⁺	0,13	-0,17	-0,74	-0,44	-0,80	0,02	-0,25	-0,29	0,88	-0,06	0,00	0,00	0,87	1,00									
Fe	0,03	-0,08	-0,75	-0,56	-0,75	0,56	0,65	0,47	0,50	0,67	-0,38	0,12	0,39	0,33	1,00								
Mn	-0,31	0,32	0,08	-0,25	0,28	0,65	0,79	0,74	-0,37	0,44	0,13	-0,41	-0,68	-0,66	0,32	1,00							
Pb	0,03	-0,04	0,25	0,41	0,12	0,04	0,45	0,38	-0,36	0,37	-0,76	0,67	-0,14	-0,54	0,38	0,41	1,00						
K ⁺	-0,05	0,03	-0,49	-0,69	-0,29	0,69	0,76	0,61	0,02	0,75	0,15	-0,41	-0,32	-0,18	0,72	0,83	0,26	1,00					
Na ⁺	0,83	-0,80	-0,11	-0,23	-0,09	-0,75	-0,82	-0,90	-0,36	0,23	0,57	-0,11	-0,20	0,11	-0,41	-0,40	-0,44	-0,27	1,00				
Ca ²⁺	-0,86	0,84	-0,14	-0,20	-0,01	0,97	0,86	0,92	0,48	-0,16	-0,10	-0,40	0,09	0,03	0,43	0,52	0,03	0,49	-0,85	1,00			
Mg ²⁺	0,69	-0,71	-0,18	-0,01	-0,31	-0,35	0,00	-0,19	-0,36	0,77	-0,45	0,62	-0,06	-0,21	0,44	0,13	0,72	0,28	0,21	-0,48	1,00		
Cr	-0,60	0,57	-0,47	-0,46	-0,36	0,69	0,34	0,41	0,84	-0,31	0,22	-0,54	0,47	0,62	0,28	-0,05	-0,58	0,16	-0,41	0,73	-0,72	1,00	
Ni	-0,13	0,15	-0,02	-0,08	0,03	-0,18	-0,57	-0,43	0,35	-0,64	0,56	-0,44	0,25	0,52	-0,56	-0,60	-0,94	-0,56	0,35	-0,08	-0,79	0,52	1,00

Le premier regroupement qui prend en compte Cl^- , Fe, Ca^{2+} , DCO, DBO_5 , Mn, K^+ et Eh traduit le phénomène de pluviollessivage des sols. Le deuxième regroupement contient Mg^{2+} , PO_4^{3-} , Sal., SO_4^{2-} , HCO_3^- , Pb, Sal, CE, HCO_3^- met en évidence une minéralisation des eaux liée au contact eau-roche (minéralisation temps de séjour). Enfin, le troisième qui prend en compte NH_4^+ , Ni, Turb., Cr, NO_2^- et NO_3^- montre une minéralisation anthropique issue des activités agricoles. En somme, les différents regroupements étudiés montrent que la minéralisation des eaux étudiées est liée à trois phénomènes importants d'éléments minéraux. Il s'agit du phénomène de pluviollessivage, de la minéralisation issue des activités

anthropiques et de la minéralisation par le contact eau-roche. Le dendrogramme (**Figure 7**) issu de la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) a mis en évidence trois principaux regroupements des variables. La première famille qui prend en compte Pb, Cl^- , CE, HCO_3^- , Ca^{2+} , DCO et Eh traduit une minéralisation liée au phénomène de pluviollessivage des sols. Le second regroupement qui est constitué de Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} , K^+ et DBO_5 explique la minéralisation temps de séjour (contact eau-roche). Le troisième est constitué de pH, Turb., Sal., Ni, Fe, PO_4^{3-} , NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- et Cr met en évidence une minéralisation liée aux apports des sels nutritifs d'origine anthropique.

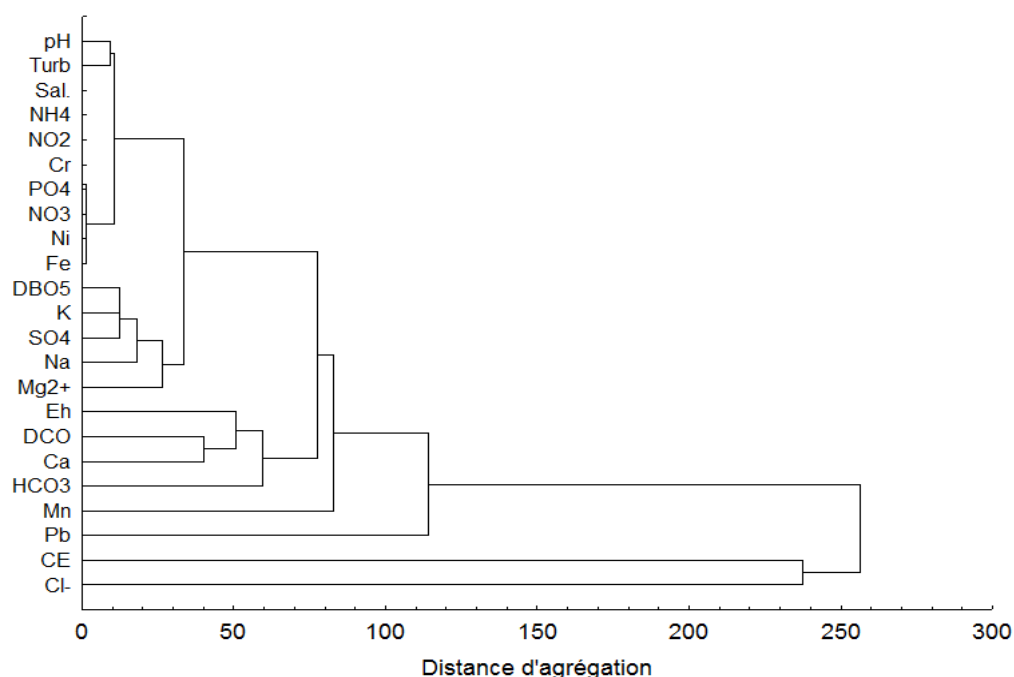


Figure 7. Dendrogramme des paramètres physico-chimiques des eaux de Mangouin-Yrongouin

La classification des points d'eau selon leur ressemblance dans le cadre d'un suivi environnemental des points d'eau étudiés est donnée par la **figure 8**. Ce dendrogramme met en évidence deux regroupements des points d'eau étudiés. Le premier regroupement prend

en compte les eaux de source (E1, E2, E3 et E5) et le second contient les eaux souterraines (E4). Pour le suivi de la qualité des eaux, il est important de choisir un point de suivi dans chaque regroupement. Ainsi, deux points d'eau sont nécessaires (un puits et une source).

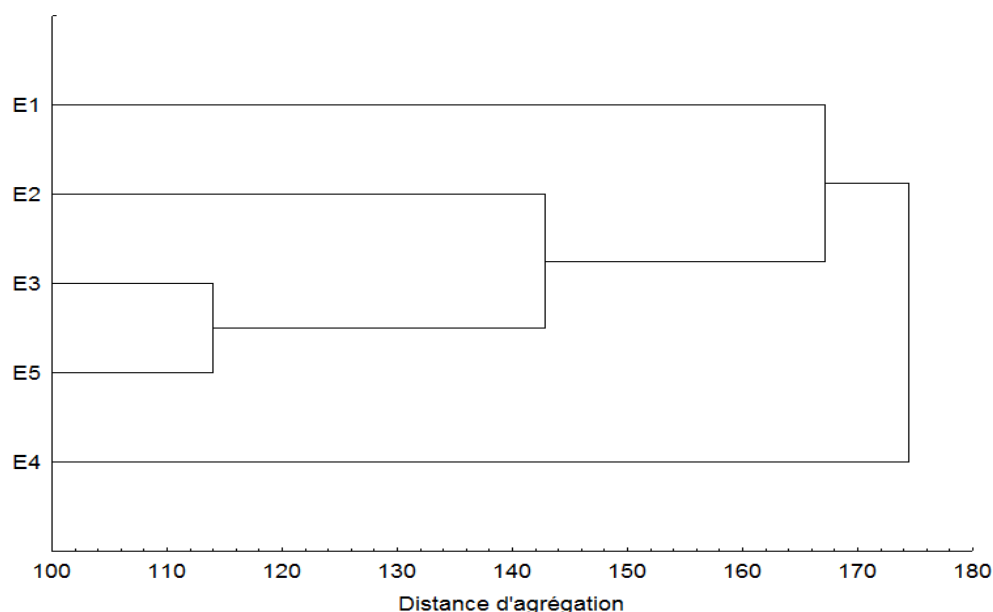


Figure 8. Dendrogramme pour la classification des points d'eau de Mangouin

Résultats des analyses microbiologiques des eaux :

Les résultats des analyses microbiologiques indiquent la présence des coliformes fécaux principalement l'*Escherichia Coli* dans l'eau du lac et l'eau de puits. La

totalité des eaux échantillonnées contiennent des *clostridium perfringens* et des coliformes totaux (tableau 7).

Tableau 7. Résultats des analyses microbiologiques des eaux de Manguin-Yrongouin

Paramètres	Méthodes	Unités	Critères	Source 1 Résultats	Lac 2 Résultats	Source 3 Résultats	Puits 4 Résultats	Source ° 5 Résultats
Dénombrement des coliformes totaux	NF V08-50	ufc/100ml	>1 /100ml	0	30 000	1000	21 00	6000
Dénombrement des <i>Escherichia Coli</i>	AFNOR BRD 07/1-07/93	ufc/100ml	>1 /100ml	0	500	0	400	0
Dénombrement des <i>clostridium perfringens</i>	NF -V-08-056	ufc/100ml	>1 /20ml	100	1500	100	100	100

Les analyses révèlent la présence de coliformes fécaux dans les eaux du lac de Granoci et dans les eaux de puits du village, avec respectivement des teneurs de 500 et 400 ufc/100 ml. Dans cette localité, toutes les eaux étudiées contiennent des fortes teneurs de *Clostridium*

Perfringens. Celles-ci varient respectivement de 100 à 1500 ufc/20 ml. La présence de ces micro-organismes dans l'eau traduit une pollution fécale d'origine humaine, ce qui rend compte de l'influence des activités anthropiques sur la qualité des eaux de source.

DISCUSSION

Les analyses *in situ* réalisées sur les eaux de source de la localité de Manguin-Yrongouin montrent que les eaux sont faiblement minéralisées, avec une conductivité électrique moyenne de 152,90 μ S/cm. Les eaux sont

acides, avec un pH qui varie de 4,85 à 6,01, pour une moyenne de 5,34. L'acidité des eaux constitue un des caractères essentiels des eaux en Côte d'Ivoire en général et dans la région de l'ouest montagneux en

particulier (Biémi, 1992). En effet, selon Tapsoba (1995), Matini et al. (2009) et Ahoussi et al. (2010), l'acidité des eaux en zone tropicale humide est principalement liée à la décomposition de la matière organique végétale, avec la production de CO_2 dans les premières couches du sol. La présence dans l'eau de CO_2 provenant des sols facilite l'hydrolyse des minéraux silicatés et la formation des ions HCO_3^- . En effet, les résultats de l'analyse multivariée montrent que dans la région l'hydrolyse acide des roches constitue un phénomène important dans la minéralisation des eaux. La région étant une zone forestière agricole, les apports de ces activités dans la minéralisation sont marqués par l'enrichissement des eaux en sels nutritifs. Les eaux étudiées contiennent les coliformes fécaux du type *Escherichia coli* et des *clostridium perfringens*. Cela montre que les eaux sont soumises à une pollution microbiologique d'origine humaine (Ahoussi et al., 2012b). En effet, la localité de Mangouin-Yrongouin, comme dans la quasi-totalité des villages de la Côte d'Ivoire est dépourvue d'un système d'assainissement adéquat. Les latrines étant inexistantes, les populations font généralement leur besoins personnels dans la nature. Dans cette localité, les pluviométries sont très abondantes et les eaux de ruissellement érodent les sols et les déposent dans les cours d'eau et les sources. Lors de cette étude, les observations de terrain ont mis en évidence la présence d'excréments humains aux alentours de différents points d'eaux. La présence de coliformes fécaux dans les eaux confirme l'influence des

activités anthropiques du village Mangouin-Yrongouin sur celles-ci. Boutin (1993) explique la présence des coliformes fécaux dans les eaux de puits par une contamination d'origine fécale et donc la possibilité que les germes pathogènes dangereux soient présents dans l'eau. En Côte d'Ivoire, l'origine fécale de la pollution des ressources en eau a été mise en évidence par les auteurs tels qu'Ahoussi et al. (2009, 2011, 2012a et 2012b), dans les eaux de surface et les eaux souterraines des localités d'Abidjan, de Kossihouen et de N'zianouan. Au Sud du Kenya, Ombaka et Gichumbi (2012) ont mis en évidence une forte pollution microbiologique d'origine anthropique dans les eaux de la rivière Ruguti au Meru. L'influence des activités anthropiques sur la qualité des eaux s'observe également dans la région de Baikunthpur, le District de Rewa, Madhya et Pradesh en Inde par Tiwari et Umesh Mishra (2012). Dans la zone d'étude, l'origine des métaux lourds dans l'eau est essentiellement liée à la nature des formations géologiques. En effet, l'ouest montagneux de la Côte d'Ivoire est une zone riche en ressources minières, avec la présence de gisements de fer, de nickel et de cobalt. Ces éléments se retrouvent dans les eaux de source et les eaux souterraines après altération de la roche mère. Les eaux de la localité de Mangouin-Yrongouin sont pauvres en lode. Cela constitue une particularité des eaux de l'ouest montagneux de la Côte d'Ivoire (Biémi, 1992).

CONCLUSION

Les études réalisées dans la localité de Mangouin-Yrongouin ont permis une caractérisation hydrogéochimique et microbiologique des ressources en eau. Cette étude montre que dans la zone d'étude, le niveau statique de la nappe phréatique varie de 0,48 m à 4,52 m, avec une moyenne de 1,24 m. Les eaux souterraines sont peu profondes et très vulnérables à la pollution d'origine anthropique. Les analyses physico-chimiques des eaux révèlent que celles-ci se classent en un seul hydrofaciès constitué par les eaux chlorurées calciques. La minéralisation des eaux de la zone d'étude est contrôlée par plusieurs phénomènes dont le pluvioléssivage des sols, l'hydrolyse acide des roches

sous-jacente et les activités anthropiques de la zone. Les analyses microbiologiques montrent également la présence de coliformes fécaux (*Escherichia coli*), et de *Clostridium Perfringens* et des coliformes totaux dans les eaux. La présence de ces microorganismes dans les eaux de Mangouin-Yrongouin montre que celles-ci sont exposées à une pollution microbiologique fécale d'origine humaine. Cette pollution détériore gravement la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux. Elle constitue un risque sanitaire pour les populations de ladite localité qui sont largement tributaires de ces eaux pour leur besoins.

REFFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ahoussi K. E., Soro N., Soro G., Lasm T., Oga M. S., Zadé S. 2008. Groundwater Pollution in Africans Biggest Towns: Case of the Town of Abidjan (Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, **20**(2) : 302-316.

Ahoussi K. E., Soro N., Soro G., Oga M. S., Zadé S. 2009. Caractérisation de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de puits de la ville d'Abidjan (Côte d'Ivoire). *Africa Geoscience Review*, **16**(3): 199-211.

- Ahoussi K. E., Soro N., Koffi Y. B., Soro G., Biémi J. 2010. Origine de la minéralisation des eaux des aquifères discontinus sous couvert forestier de la zone Sud de la Côte d'Ivoire: cas de la région d'Abidjan-Agboville. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **4**(3): 782-797.
- Ahoussi K. E., Oga Y. M. S., Koffi Y. B., Kouassi A. M., Soro N., Biémi J. 2011. Caractérisation hydrogéochimique et microbiologique des ressources en eau du site d'un Centre d'Enfouissement Technique (CET) de Côte d'Ivoire : cas du CET de Kossihouen dans le District d'Abidjan (Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **5**(5): 2114-2132.
- Ahoussi K. E., Koffi Y. B., Kouassi A. M., Soro G., Soro N., Biémi J. 2012a. Étude des caractéristiques chimiques et microbiologiques des ressources en eau du bassin versant du N'zi : cas de la commune de N'zianouan (Sud de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **6**(4): 1854-1873
- Ahoussi K. E., Koffi Y. B., Kouassi A. M., Soro G., Soro N., Biémi J. 2012b. Caractérisation Physico-Chimique et Bactériologique des Ressources en eau des Localités Situées Aux Abords de la lagune Ebrié dans la commune de Marcory (District d'Abidjan, Côte Ivoire) : cas du village d'Abia Koumassi. *European Journal of Scientific Research*, Vol. 89 No 3 : 359-383
- Biémi J. 1992. Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants Subsahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Hydrostructurale, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus des sillons et aires granitiques de la Haute Marahoué (Côte d'Ivoire). Thèse d'Etat, Université Nationale de Côte d'Ivoire, p. 480.
- Boutin C. 1993. L'eau des nappes phréatiques superficielles, une richesse naturelle mais vulnérable. L'exemple des zones rurales du Maroc. *Sciences de l'eau*, **6**(3) : 357-365.
- Camil J, Tempier. P, vachette. C. 1984. Schéma pétrographique et structural et chronologique des formations archéennes de la région de Man (Côte d'Ivoire). Leur rôle dans la cratonisation de l'Ouest Africain. *Geol. Afric. Ed. Tervuren*, 10 p.
- Coulibaly A., Mondé S., Wognin V. A., Aka K. 2008. State of anthropic pollution in the estuary of Ebrié lagoon (Côte d'Ivoire) by analysis of the metal elements traces. *European Journal of Scientific Research*, **19**(2): 372-390.
- DJRO. S. C. (1998): Evolution tectono-métamorphiques des gneiss granulitiques archéens du secteur de Biankouma. Thèse de Doctorat d'Etat de l'Université de Cocody, p.171.
- Güler C., Thyne G. D., Mccray J. E., Tuner A. K. 2002. Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal* (10) : 455-474.
- Kouamelan A. N. 1996. Géochronologie et géochimie des formations Archéennes et Protérozoïques de la dorsale de Man en Côte d'Ivoire. Implications pour la transition Archéenne-protérozoïque. *Thèse. Doct. Es Sc Nat. Univ. Rennes 1*. 277 p.
- Kouzana L., Ben Mammou A., Gaaloul N. 2007. Intrusion marine et salinisation des eaux d'une nappe phréatique côtière (Korba, Cap-Bon, Tunisie). *Geo-Eco-Trop.*, **31** : 57-70.
- Matini L., Moutou J.M., Kongo-Mantono M.S. 2009. Evaluation hydrochimique des eaux souterraines en milieu urbain au Sud-Ouest de Brazzaville, Congo. *Afrique Science* **05**(1) : 82-98.
- Ombaka O., Gichumbi 2012. Water quality assessment of Ruguti River in Meru South, Kenya. *International Journal of Water and Environmental Engineering*, Vol.4 (12): 404-414.
- OMS 2008. Guidelines for Drinking-water Quality. Third edition, incorporating the first and second Addenda, Recommendations, Geneva, Volume 1, p 515.
- Oga M. S., Lasm T., Yao T. K., Soro N., Saley M. B., Kouassi D., Gnamba F. 2009. Caractérisation chimique des eaux des aquifères de Fracture: Cas de La Région de Tiassalé en Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research*, **31**(1):72-87.
- Saley M. B. 2003. Cartographie thématique des aquifères de fissures pour l'évaluation des ressources en eau. Mise en place d'une nouvelle méthode d'extraction des discontinuités images et d'un SIHRS pour la région semi-montagneuse de Man (Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat d'Université de Cocody-Abidjan, 209 p.
- Soro N., Ouattara L., Dongo K., Kouadio K. E., Ahoussi K. E., Soro G., Oga Y. M.-S., Savane I., Biémi J.

2010. Déchets municipaux dans le District d'Abidjan en Côte d'Ivoire : sources potentielles de pollution des eaux souterraines. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **4** (6): 2203-2219.
- Tiwari R. N., Umesh Mishra 2012. Groundwater quality and pollution potential studies around Baikunthpur area, Rewa District, Madhya Pradesh, India. *International Journal of Water and Environmental Engineering*, Vol.4 (12): 377-385.
- Tapsoba S. A. 1995. Contribution à l'étude Géologique et Hydrogéologique de la région de Dabou (Sud de la Côte d'Ivoire) : Hydrochimie, Isotopie et Indice de vieillissement des eaux souterraines, Thèse de 3^e cycle de l'Université Nationale de Côte d'Ivoire, p. 200.
- Thilagavathi R., Chidambaram S., Prasanna M. V. Thivya C., Singaraja C. 2012. A study on groundwater geochemistry and water quality in layered aquifers system of Pondicherry region, southeast India. *Applied. Water Science*. 2: 253-269.
- Yermani M, Zouari K, Michelot J.L., Mamou A, Moumni L. 2003. Approche géochimique du fonctionnement de la nappe profonde de Gafsa Nord (Tunisie centrale). *Journal des Sciences Hydrologiques*, **48**(1): 95-108.
- Yidana S.M., Ophori D., Banoeng-Yakubo B. 2008. A multivariate statistical analysis of surface water chemistry data – The Ankobra Basin, Ghana. *Journal of Environmental Management*, 86: 80-87.