

**Caractérisation des éléments traces métalliques (Mn, Ni, Zn, Cd, Cu, Pb, Cr, Co, Hg, As) dans les eaux superficielles de la commune de Marcory, Abidjan Côte d'Ivoire : cas du village d'Abia Koumassi.**

**Characterization of metallic trace elements (Mn, Ni, Zn, Cd, Cu, Pb, Cr, Co, Hg and As) in superficial waters of Marcory, Abidjan, Ivory Coast : study of the village of Abia Koumassi.**

AHOUSSEI Kouassi Ernest<sup>1</sup>, KOFFI Yao Blaise<sup>1</sup>, LOKO Solange<sup>2</sup>, KOUASSI Amani Michel<sup>3</sup>, SORO Gbombélé<sup>1</sup> & BIEMI Jean<sup>1</sup>

**Abstract :** The present study treats risks of pollution of water resource in the village of Abia Koumassi in the Abidjan area. The Method used for the realization of this study is a physico-chemical analysis of elements metallic traces (ETM). The results were treated thanks to the Cluster Analysis and Principal Component Analysis for highlighting the phenomena of water pollution. Most water of the village of Abia Koumassi have a neutral pH which varies from 6.80 to 7.62. The temperature's average of waters is 27.7 °C - 29.8 °C. Waters are mineralized, with an electrical conductivity which varies from 585 S/cm to 1310 S/cm. They present also strong contents of metallic trace elements (MTE) such as Zn, Co, Cr, Pb, Fe<sup>2+</sup>, Cu and Cd. Important values are the following ones: Ni 0.072 mg.L<sup>-1</sup> and 0.085 mg.L<sup>-1</sup>, at the level of waters of lagoons; Zn (0.077 mg.L<sup>-1</sup> for waters from well); Pb (0.004 mg.L<sup>-1</sup>, for waters from well); Cr (0.649 mg.L<sup>-1</sup>, for lagoon water and 0.613 mg.L<sup>-1</sup> for waters from well); Co (0.115 mg.L<sup>-1</sup>, for lagoon water and 0.361 mg.L<sup>-1</sup>, for waters of well). MTE pollution of waters of the Abia Koumassi village results from anthropogenic activities. They are in most cases of industrial, craft, urban and domestic main drainage. This study shows that waters from the area can be harmful for health

**Key words :** Abidjan Lagoon, Statistical Analysis, Environment, Pollution, Cleaning up and Water quality.

**Résumé :** La présente étude traite des risques de pollution des ressources en eau du village d'Abia Koumassi, situé dans la ville d'Abidjan. La méthode utilisée pour entreprendre cette étude repose sur des analyses physico-chimiques pour mettre en évidence la composition chimique en éléments traces métalliques (ETM) dans les eaux. Ces résultats ont été traités grâce à la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) et à l'Analyse en Composantes Principales (ACP) pour la mise en évidence des phénomènes de pollution des eaux. Les ressources en eau du village d'Abia Koumassi ont un pH pratiquement neutre qui varie de 6,8 à 7,62. La température des eaux oscille entre 27,7 °C et 29,8 °C. Les eaux souterraines sont très minéralisées, avec une conductivité électrique qui varie de 585 S/cm à 1310 S/cm. Celles-ci présentent également de fortes teneurs en éléments traces métalliques (ETM) tels que Ni, Zn, Co, Cr, Pb, Fe<sup>2+</sup>, Cu et Cd. Pour les eaux de la lagune Ebrié, les teneurs les plus élevées en ETM sont : 0,072 mg.L<sup>-1</sup> et 0,085 mg.L<sup>-1</sup> pour le Ni, 0,649 mg.L<sup>-1</sup>, pour le Cr et 0,115 mg.L<sup>-1</sup>, pour les Co. Au niveau des eaux souterraines les fortes teneurs sont : 0,077 mg.L<sup>-1</sup> pour le Zn, 0,004 mg.L<sup>-1</sup>, pour le Pb, 0,613 mg.L<sup>-1</sup>, pour le Cr, et 0,361 mg.L<sup>-1</sup>, pour le Co. Les ETM présents dans les eaux sont d'origine anthropique. Ils sont issus principalement des rejets industriels, artisanaux, urbains et domestiques. Cette étude montre que les ressources en eau de la zone d'étude sont sous l'influence d'activités anthropogéniques qui représentent un risque pour la santé des populations.

**Mots clés :** Lagune d'Abidjan, Analyse statistique, Environnement, Pollution, Assainissement, Qualité de l'eau.

1. Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody-Abidjan, Unité de Formation et de Recherche (UFR) des Sciences de la terre et des Ressources Minières (STRM) ; 22 BP 582 Abidjan 22 ; Tel : (+225) 22 48 38 03 (Côte d'Ivoire) ; Courriel : [ahoussi@gmx.fr](mailto:ahoussi@gmx.fr)

2. Université Technologique et Tertiaire Loko (UTTLOKO), Laboratoire de chimie et de Microbiologie, 05 BP 671 Abidjan 05 Côte d'Ivoire; Tél : 00 225 21 21 19 20; Courriel : [solyfleur@hotmail.com](mailto:solyfleur@hotmail.com)

3. Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB) ; Département des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STeRMi) ; Laboratoire du Génie Civil, des Géosciences et des Sciences Géographiques ; BP 1093 Yamoussoukro (Côte d'Ivoire), Tél. (+225) 30 64 67 15 (Côte d'Ivoire).

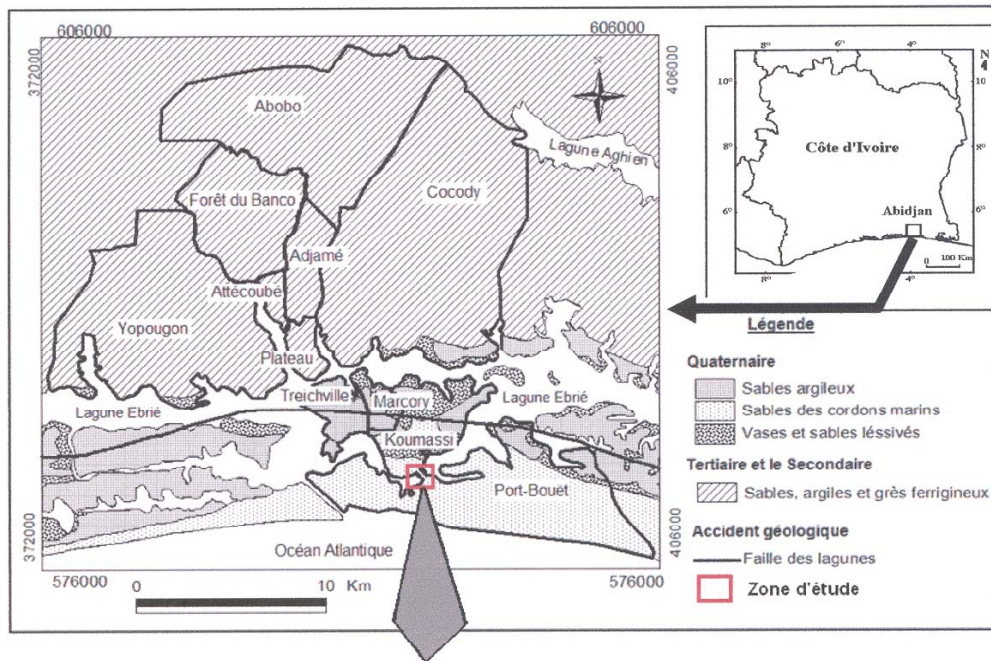
Courriel : [michel.a\\_kouassi@yahoo.fr](mailto:michel.a_kouassi@yahoo.fr) et [michel\\_kouassi@inphb.edu.ci](mailto:michel_kouassi@inphb.edu.ci)

## INTRODUCTION

La ville d'Abidjan, qui constitue l'une des grandes villes de l'Afrique de l'Ouest est confrontée à une croissance démographique galopante suivie d'une urbanisation et d'une industrialisation accélérées. Cette ville cosmopolite abrite de nombreuses activités industrielles et artisanales qui sont à l'origine de la production de déchets de toute nature. Ces déchets sont à l'origine de la dégradation et de l'environnement et du cadre de vie des populations. Le village d'Abia Koumassi, situé dans la commune de Marcory, constitue un des quartiers précaires de la ville d'Abidjan. A l'instar des autres quartiers précaires de la Côte d'Ivoire et des pays de l'Afrique de l'Ouest, il est dépourvu d'un véritable système d'assainissement. Le système d'évacuation des eaux usées est insuffisant et présente beaucoup de lacunes. Dans la ville d'Abidjan où se situe ce quartier, le constat est le même. Les études réalisées dans le District d'Abidjan par des auteurs tels que DONGO *et al.* (2008) et KOUAME (2007) ont montré que le taux de raccordement des ménages au réseau d'assainissement est limité à 29%. Les déchets non collectés (45%) se retrouvent directement dans la nature, entraînant un risque de détérioration de la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines. De nombreuses études ont été réalisées sur l'influence de l'urbanisation et de la démographie sur les ressources en eau de la ville d'Abidjan. Parmi celles-ci, on peut citer les travaux effectués par COULIBALLY *et al.* (2008); AHOUSI *et al.* (2009 ; 2010), SORO *et al.* (2010). Ces études ont mis en évidence la présence dans ces eaux de fortes teneurs en composés azotés dont les nitrates, les nitrites, l'ammonium et des métaux lourds dans les eaux souterraines. Au niveau des eaux de surface, notamment les eaux et les sédiments de la lagune Ebrié, de fortes teneurs en éléments traces métalliques (ETM) ont également été observées. Ces teneurs sont souvent supérieures aux normes de potabilité des eaux proposées par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, 2008). Les ETM présents dans les eaux de la ville d'Abidjan ont une origine anthropique et sont liés aux activités domestiques, artisanales et industrielles de la ville. Au niveau des sédiments de la lagune Ebrié, les travaux de SORO *et al.* (2009) ont révélé également la présence de fortes teneurs en éléments traces métalliques (ETM). Le village d'Abia Koumassi, situé au bord de la lagune Ebrié, est une zone qui regroupe des baies lagunaires qui abrite des industries et de nombreuses activités artisanales. Ces activités anthropiques engendrent de nombreux problèmes de pollution des ressources en eaux de surface et souterraines que les autorités doivent résoudre. Selon les différentes études, cette lagune est soumise à une pollution liée au déversement des eaux usées domestiques et industrielles sans traitement préalable ou insuffisamment traité. Le développement des activités industrielles notamment le domaine pétrolier en Côte d'Ivoire et le manque de système d'assainissement adéquat au niveau de ce quartier précaire ne sont pas sans risque de pollution pour les ressources en eau du village d'Abia Koumassi. Cette étude vise à évaluer les risques environnementaux liés aux éléments traces métalliques (ETM) auxquels sont confrontées les populations qui utilisent les ressources en eaux du village.

## CADRE GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

Le village d'Abia Koumassi est un quartier précaire de la ville d'Abidjan et de la commune de Marcory. Il se situe au sud d'Abidjan entre les latitudes 5°00' et 5°30' N et les longitudes 3°50' et 4°10' W (**figure 1**). Abia Koumassi compte environ 4 000 habitants. Le climat est de type équatorial de transition, avec 4 saisons dont 2 saisons de pluies et 2 saisons sèches. La pluviométrie moyenne interannuelle est supérieure à 2000 mm. La température moyenne mensuelle mesurée à la station météorologique de Port-Bouët à Abidjan varie de 24°C à 30°C, avec une valeur moyenne de 26°C. L'insolation moyenne varie de 6 à 7 h/j à l'exception des mois de juin, juillet, août et septembre où elle est en-dessous de 6 h/j. L'humidité relative moyenne est de 83% et reste supérieure à 70% toute l'année.



**Figure 1.** Présentation de la zone d'étude

La géologie de la zone d'étude, s'identifie à celle du sud de la ville d'Abidjan, située sur le bassin sédimentaire côtier de la Côte d'Ivoire. Ce dernier niveau de la ville d'Abidjan se présente sous la forme d'un croissant dont les pointes sont tournées vers la mer. Il s'étend sur 400 km de long et 40 km de large et ne représente que 2,5 % de la superficie du pays. La lithostratigraphie du bassin sédimentaire est marquée par des formations d'âge crétacé-quaternaire, avec des importantes variations latérales et verticales de toutes les formations lithologiques. Le Continental Terminal, formation d'âge mio-pliocène est caractérisé par une stratification lenticulaire, des sables grossiers, des argiles bariolées, des grès ferrugineux et des minerais de fer.

Sur le plan paléogéographique, du Crétacé au Quaternaire actuel, trois épisodes de transgression sont bien connus: Albo-Aptien : argiles et grès du Crétacé inférieur ; Maastrichtien-Eocène inférieur: argiles glauconieuses, argiles et sables et Miocène inférieur : marnes noires à reliques de requins, argiles bariolées et lignites. Le bassin sédimentaire ivoirien est traversé par une grande faille Est-Ouest appelée faille des lagunes de pendage sud, avec un rejet qui atteint 5000 m. De part et d'autre de la faille des lagunes, le bassin ivoirien présente deux parties distinctes. Au nord, les sédiments de recouvrement présentent une structure monoclinale parce que toutes les couches plongent vers le sud et leur épaisseur est environ de 300 m. Du point de vue hydrogéologique, la zone d'étude est marquée par la présence de l'aquifère du Quaternaire qui contient la nappe la plus vulnérable de la ville d'Abidjan. L'aquifère du Quaternaire présente les formations généralement marno-argileuses et imperméables, sauf rares exceptions. Il recèle deux types de nappes phréatiques dont la nappe de l'Oogolien qui se développe essentiellement dans les sables fins à grossiers et celle du Nouakchottien qui loge dans des sables marins grossiers. Selon AGHUI & BIEMI (1984), le niveau piézométrique de l'eau dans la nappe est peu profond et varie de 0 à 1 m. Les sources provenant des dépôts du Quaternaire sont assez nombreuses le long des rives de la lagune Ebré, ce qui met en évidence les conditions favorables d'évacuation d'une partie de l'excès d'eau apporté par les précipitations.

## MATERIELS ET METHODES

### Matériels et données

La réalisation de cette étude a nécessité l'organisation d'une campagne d'échantillonnage et d'analyse hydrogéochimique réalisée sur les ressources en eau du village d'Abia Koumassi en juin 2010, pendant la grande saison des pluies à Abidjan. Les prélèvements ont porté essentiellement sur les eaux de puits et les eaux de la lagune Ebré. Dans cette étude, tous les puits ayant fait objet

d'échantillonnage sont utilisés pour les activités domestiques des populations. Lors de cette campagne, les échantillons d'eau destinés aux analyses chimiques ont été prélevés dans des bouteilles en polyéthylène de capacité d'un 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. Au cours de l'échantillonnage, les paramètres physiques des eaux tels que la température (T°), le pH, la conductivité électrique (CE), la salinité (Sal.), le taux d'oxygène dissous (O<sub>2</sub>) et le potentiel d'oxydoréduction (Eh) ont été mesurés *in situ* sur les puits pour les eaux souterraines et dans la lagune Ebrié pour les eaux de surface. Le matériel de terrain utilisé pour cette étude est constitué d'un pH-mètre Star 4 et d'un conductimètre Hach Sension 5 pour la mesure des paramètres physiques des eaux. Le repérage des coordonnées des points d'échantillonnage a été fait à l'aide du GPS Garmin Map 60 CSX. Au total, nous avons prélevé pour des analyses chimiques, 10 échantillons dont 02 pour la lagune Ebrié et 08 pour les eaux de puits. Sur les échantillons d'eau, les éléments tels que Mn, Ni, Zn, Cd, Cu, Pb, Cr, Co, Hg, As et Fe<sup>2+</sup> ont été analysés. Ces ETM ont été dosés à l'aide d'un spectrophotomètre à absorption atomique (SAA).

## Méthodologie de l'étude

L'approche méthodologique appliquée aux résultats des analyses et aux mesures *in situ* est marquée premièrement par une comparaison des paramètres mesurés aux normes de potabilité de l'OMS (2008). Ensuite, pour l'étude de la distribution spatiale des ETM dans les eaux, une cartographie à l'aide du logiciel Arc view 3.2 a été effectuée. L'étude de l'origine de la minéralisation des eaux du village a nécessité l'application de l'analyse statistique multivariée aux données de terrain et d'analyse au laboratoire. L'analyse statistique a nécessité l'utilisation de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) sur des variables centrées réduites couplée à l'analyse par Classification Hiérarchique Ascendante (CHA). Ces deux analyses sont couramment utilisées dans le traitement des données dans le domaine des sciences de l'eau, avec de bons résultats. Ces méthodes statistiques ont été utilisées par TRAVI & MUDRY (1997) sur les aquifères du socle de la zone sahélienne d'Afrique de l'Ouest. ROUABHIA *et al.* (2004) ont également utilisé cette méthode pour étudier la vulnérabilité et les risques de pollution des eaux souterraines de la plaine d'El Ma El Abiod en Algérie, MATINI *et al.* (2009) sur les eaux souterraines en milieu urbain au sud-ouest de Brazzaville, Congo ; YIADANA *et al.* (2008) et YIADANA (2010) sur les eaux souterraines du Ghana. En Côte d'Ivoire, cette méthode statistique a été utilisée par BIEMI (1992) sur les eaux de la région de la Marahoué, SAVANE & SORO (2010) sur les eaux de la région d'Odienné, OGA (1998) sur les eaux de la région du Grand Abidjan, AHOUSSEI *et al.* (2009) sur les eaux de la région d'Abidjan-Agboville, KOUASSI *et al.* (2010) sur les eaux souterraines de la région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire) et SORO (2010) sur les eaux souterraines de la région des Lacs.

L'analyse comporte 10 descripteurs et 16 variables dont la température (T°), la salinité (Sal.), la conductivité électrique (CE), le pH, le potentiel d'oxydoréduction (Eh), l'oxygène dissous (O<sub>2</sub>), les ions Fe<sup>2+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, et les éléments traces métalliques Mn, Ni, Zn, Cd, Cu, Pb, Cr et Co. Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel STATISTICA version 6.0.

## RESULTATS

### Résultats des paramètres physiques des eaux

Les paramètres physiques des eaux souterraines et des eaux de lagune Ebrié mesurés sur le terrain sont consignés dans le tableau I.

Le pH moyen des eaux de la lagune Ebrié est de 7,35 ± 0,08. Les eaux souterraines ont un pH moyen de 7,15 ± 0,09, ce qui montre que les ressources en eau du village sont neutres. Le potentiel d'oxydoréduction moyen est de -4,57 ± 0,49 mV au niveau des eaux de la lagune Ebrié et de -42,72 ± 5,38 mV pour les eaux souterraines. Ces valeurs montrent que les eaux du village évoluent dans un milieu réducteur. La valeur moyenne en oxygène dissous observée dans les eaux de la lagune Ebrié est

de  $4,41 \pm 0,16 \text{ mg.L}^{-1}$ . Au niveau des eaux souterraines, celle-ci s'élève à  $3,21 \pm 0,35 \text{ mg.L}^{-1}$ . La température moyenne des eaux de surface est de  $29,15 \pm 0,15 \text{ °C}$  et de  $28,73 \pm 0,26 \text{ °C}$  au niveau des eaux souterraines. Les eaux présentent de très fortes valeurs de la conductivité électrique. Celle-ci varie de 6980 à 7670 S/cm, pour les eaux de la lagune Ebrié et de 585 à 1310 S/cm pour les eaux souterraines. Les valeurs moyennes du TDS (Total de Solides Dissous) des ressources en eau du village évoluent dans le même ordre que celui de la conductivité électrique. La répartition graphique du TDS dans les ressources en eau du village d'Abia Koumassi est donnée par la figure 2. Cette carte montre que les eaux de surface sont plus riches en solides dissous que les eaux souterraines. Les eaux de la lagune Ebrié sont plus salines par rapport aux eaux souterraines. La salinité moyenne des eaux de la lagune est de  $4,20 \pm 0,71\%$ , contre  $0,41 \pm 0,04\%$ , pour les eaux souterraines.

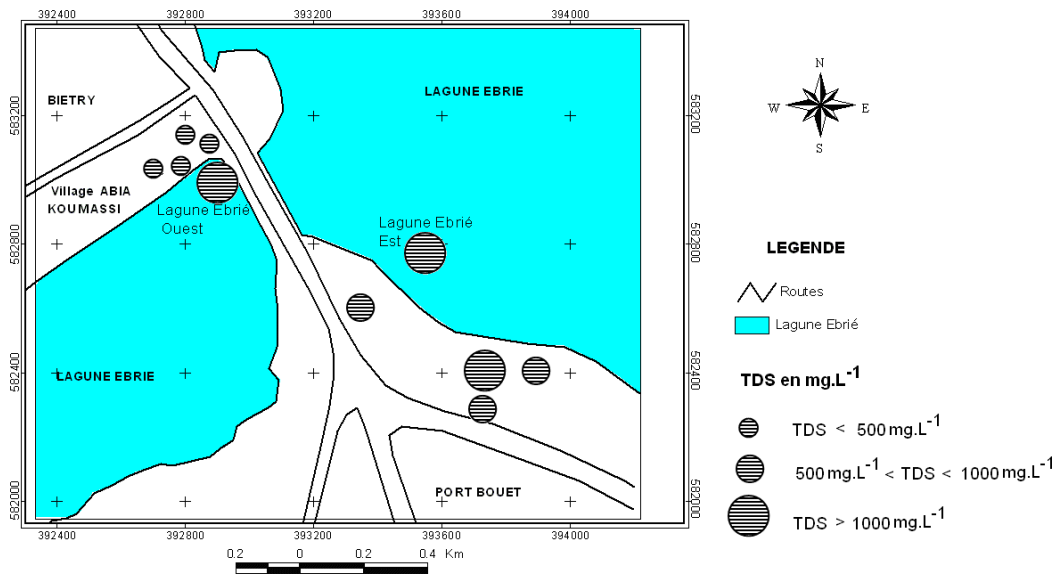
**Tableau I.** Résultats de l'analyse des analyses physico-chimiques des eaux d'Abia Koumassi en  $\text{mg.L}^{-1}$

Points de mesures	CE	TDS	pH	O <sub>2</sub>	Eh	Fe <sup>2+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Mn	Ni	Zn	Cd	Cu	Pb	Cr	Co	As	Hg
Lagune Est	6980	3700	7,26	4,57	-4,08	0,20	0,27	<0,001	0,072	0,011	<0,001	0,026	<0,001	0,591	0,115	<0,001	<0,001
Lagune Ouest	7670	4100	7,43	4,25	-5,06	0,25	0,66	<0,001	0,085	0,012	0,003	0,023	<0,001	0,649	0,109	<0,001	<0,001
P1	585	284	7,17	2,3	-34,6	0,62	0,65	<0,001	0,074	0,018	0,019	0,025	0,004	0,001	0,126	<0,001	<0,001
P2	784	383	6,8	3,72	-22,6	0,27	116,8	<0,001	0,083	0,077	<0,001	0,026	<0,001	0,094	0,002	<0,001	<0,001
P3 Eglise Ste Thérèse	671	326	7,14	4,11	-43,6	0,38	67,79	<0,001	0,018	0,03	<0,001	0,021	<0,001	0,380	0,015	<0,001	<0,001
P4 Chef	762	372	7,62	3,9	-72,7	0,07	5,761	<0,001	0,003	0,013	<0,001	0,020	<0,001	0,34	0,022	<0,001	<0,001
P5 Akwuaba	1075	529	7,3	4,1	-53,2	0,19	6,99	<0,001	0,014	0,004	0,005	0,013	0,001	0,474	0,149	<0,001	<0,001
P6 Ancien stockage de fer	1310	741	7,04	1,72	-37,8	12,8	0,19	0,687	0,145	0,021	0,013	0,03	0,002	0,613	0,361	<0,001	<0,001
P7 Aéroport	1197	590	7,17	2,13	-45,2	5,60	1,05	0,07	0,059	0,217	0,027	0,02	0,003	0,277	0,122	<0,001	<0,001
P8 Lavage	878	429	6,95	3,71	-32,1	1,50	63,65	<0,001	0,03	0,054	0,013	0,025	0,001	0,43	0,209	<0,001	<0,001

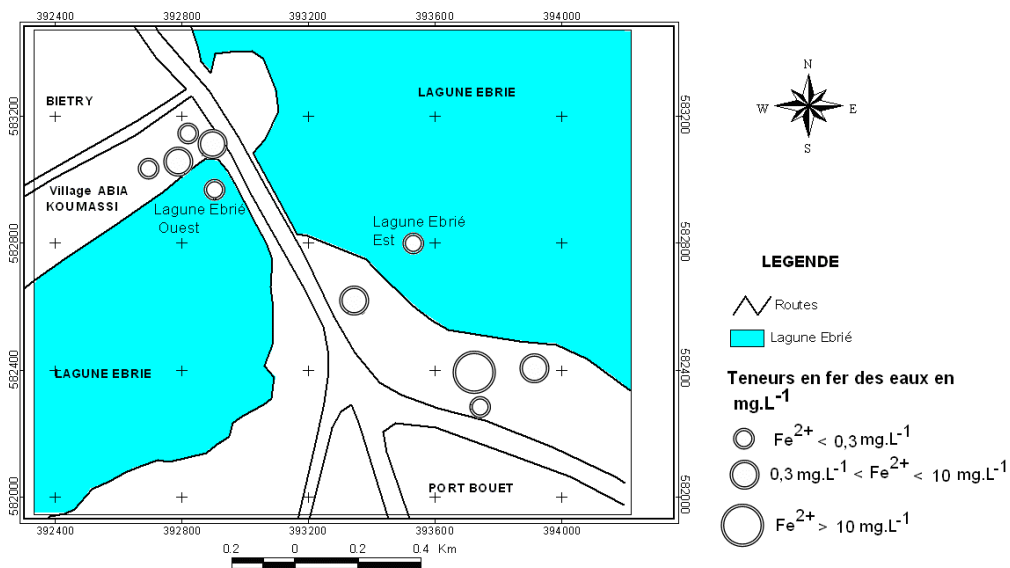
\*CE en S/cm ; TDS en  $\text{mg.L}^{-1}$  ; Eh en mV ; O<sub>2</sub> en  $\text{mg.L}^{-1}$ , Sal. en %

### Eléments traces métalliques (ETM) dans les eaux

Les résultats des analyses chimiques réalisées sur les eaux de la zone d'étude montrent que celles-ci contiennent de fortes teneurs en ion Fe<sup>2+</sup>. Ces valeurs en fer oscillent entre  $0,07 \text{ mg.L}^{-1}$  et  $12,8 \text{ mg.L}^{-1}$ , pour les eaux souterraines. La plus forte concentration qui est de  $12,8 \text{ mg.L}^{-1}$  est observée au niveau des eaux souterraines captées par un puits implanté dans une ancienne décharge. En effet, cette décharge est utilisée pour le stockage de la ferraille. La répartition spatiale du fer dans les eaux du village est donnée par la carte de la figure 3. Cette carte montre que les eaux souterraines sont plus riches en fer que les eaux de la lagune Ebrié. Les fortes teneurs s'observent aux puits P3 ( $0,38 \text{ mg.L}^{-1}$ ), P7 ( $5,6 \text{ mg.L}^{-1}$ ), P8 ( $1,5 \text{ mg.L}^{-1}$ ) et P6 ( $12,8 \text{ mg.L}^{-1}$ ). Les résultats du dosage des éléments traces métalliques (ETM) montrent par contre que l'arsenic, le mercure, et manganèse sont pratiquement absents dans les eaux de la zone d'étude.

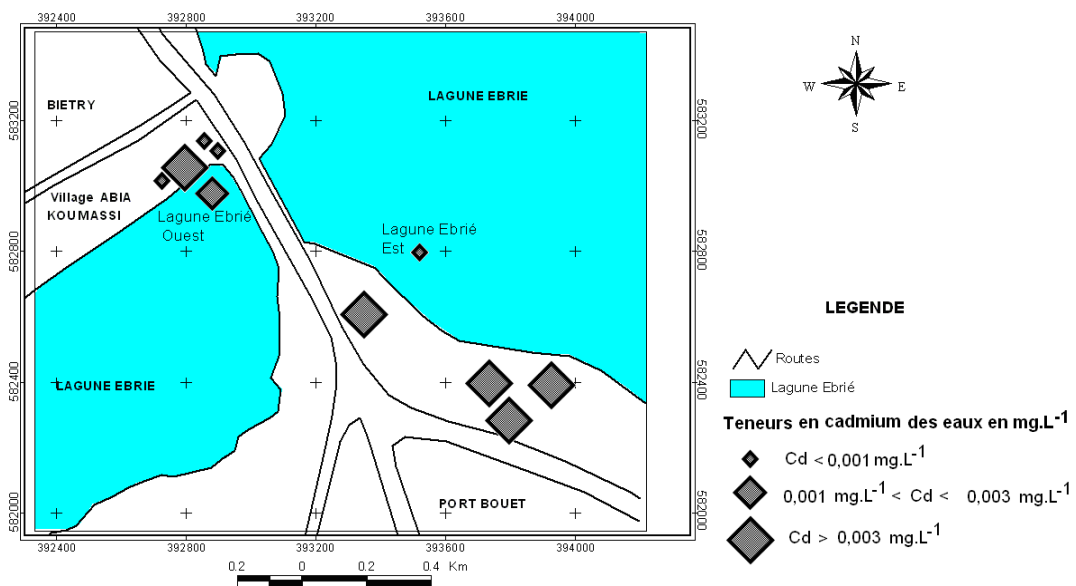
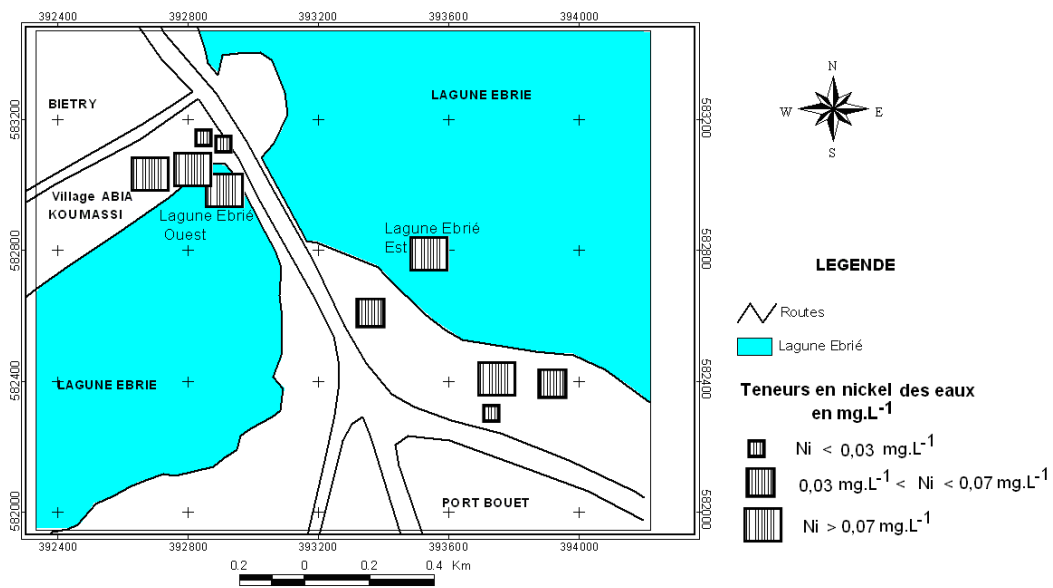


**Figure 2.** Carte de distribution spatiale du TDS des eaux du village d'Abia Koumassi



**Figure 3.** Carte de distribution spatiale des teneurs de fer dans les eaux du village d'Abia Koumassi.

Contrairement à ces différents éléments, dans les eaux sont présents des ETM tels que le Ni ( $0,072 \text{ mg.L}^{-1}$  et  $0,085 \text{ mg.L}^{-1}$  pour les eaux de la lagune) ; le Zn ( $0,077 \text{ mg.L}^{-1}$  pour les eaux de puits) ; le Pb ( $0,004 \text{ mg.L}^{-1}$ , pour les eaux de puits) ; le Cr ( $0,649 \text{ mg.L}^{-1}$ , pour les eaux de la lagune et  $0,613 \text{ mg.L}^{-1}$  pour les eaux de puits) ; Co ( $0,115 \text{ mg.L}^{-1}$ , pour les eaux de la lagune et  $0,361 \text{ mg.L}^{-1}$ , pour les eaux de puits) (figures 4, 5 et 6).



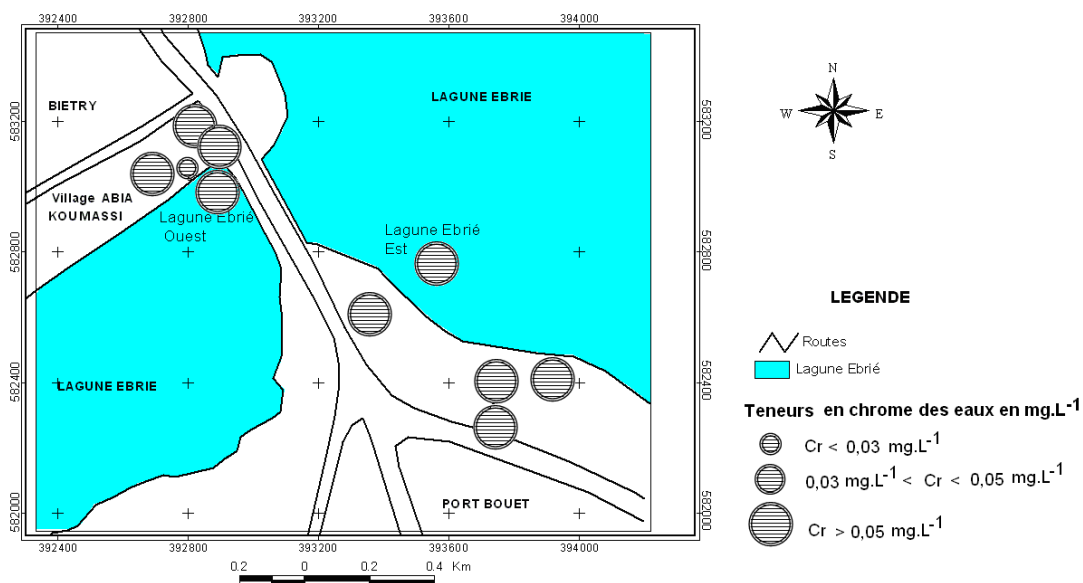


Figure 6. Carte de la distribution géographique du chrome dans les eaux du village d'Abia Koumassi

## Résultats de l'étude statistique multivariée

### Analyse en Composantes Principales (ACP)

Les résultats de l'Analyse en Composantes Principales sont présentés sous forme de plusieurs tableaux. Dans le tableau II sont consignés les valeurs propres, les variances exprimées par chaque facteur et leur cumul. Le facteur F1 est le plus important, avec une variance exprimée de 33,89%, ensuite viennent les facteurs F2 et F3, avec respectivement 22,90% et 17,26% de la variance exprimée. Ces trois facteurs permettent de représenter de manière significative le nuage de points et contiennent le maximum d'informations recherchées.

Tableau II. Valeurs propres et pourcentage de variance exprimée cumulée

Facteurs	Valeur propre	% Total de variance exprimée	Cumul de valeur propre	% de variance exprimée cumulée
1	5,42	33,89	5,42	33,89
2	3,64	22,77	9,07	56,67
3	3,00	18,77	12,07	75,44

La contribution des différentes variables dans la définition des principaux facteurs est donnée par le tableau III.



**Tableau III.** Contributions des variables dans la détermination des facteurs

	<b>Fact. 1</b>	<b>Fact. 2</b>	<b>Fact. 3</b>
<b>Sal</b>	0,111	0,080	0,016
<b>CE</b>	0,000	0,203	0,025
<b>pH</b>	0,016	0,004	0,229
<b>T°C</b>	0,002	0,048	0,167
<b>O<sub>2</sub></b>	0,105	0,077	0,013
<b>Eh</b>	0,007	0,172	0,042
<b>Fe<sup>2+</sup></b>	0,139	0,000	0,002
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	0,026	0,000	0,186
<b>Mn</b>	0,112	0,036	0,001
<b>Ni</b>	0,126	0,039	0,037
<b>Zn</b>	0,004	0,076	0,027
<b>Cd</b>	0,067	0,026	0,015
<b>Cu</b>	0,059	0,048	0,085
<b>Pb</b>	0,061	0,114	0,002
<b>Cr</b>	0,017	0,076	0,137
<b>Co</b>	0,148	0,001	0,017

Chaque facteur est défini par un certain nombre de variables essentielles dans la mise en évidence du mécanisme à l'origine de la minéralisation des eaux. Dans le tableau III, le facteur F1 est défini par Sal., Co, Ni, Mn, Fe<sup>2+</sup> et O<sub>2</sub>.

La contribution des différentes variables dans la détermination des facteurs nécessaires à l'interprétation des données est présentée par le tableau IV.

La matrice de corrélation (tableau V) donne les liens significatifs qui existent entre les différentes variables nécessaires à l'étude des paramètres de la minéralisation des eaux. Ces liens sont traduits par les différentes corrélations supérieures à 0,5 qui existent entre les variables étudiées. Ainsi il existe de fortes corrélations entre Fe<sup>2+</sup>-Sal. (0,85), Pb-Cd (0,82), Ni-Sal. (0,79), Mn-Sal. (0,69), Ni-Cu (0,76), Co-Sal. (0,69) et Cr-Sal. (0,69).

Ces importantes corrélations montrent que ces éléments participent énormément à la minéralisation des eaux.

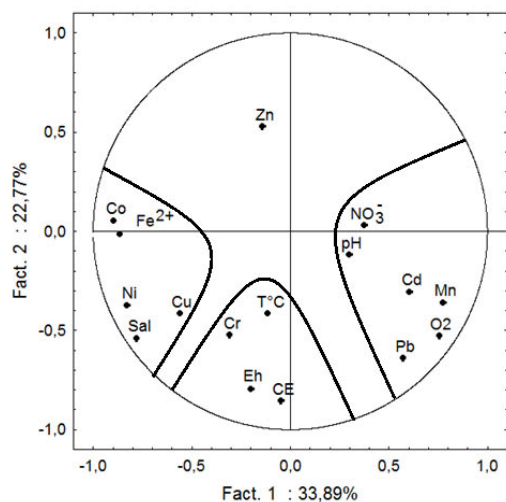
L'interprétation des résultats de l'ACP dans l'espace des variables du plan factoriel F1-F2 permet la réalisation de la figure 7. Celle-ci indique que ce plan exprime 56,67% de la variance exprimée. Le facteur F1 (33,89%) est déterminé par deux principaux regroupements de variables. Le premier regroupement prend en compte NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, pH, Cd, Mn, Cr et Pb qui s'opposent au deuxième composé de Co, Cu, Ni, Sal., et Fe<sup>2+</sup>. Ces différents regroupements des variables montrent que dans la zone d'étude, la minéralisation des eaux est contrôlée principalement par les ETM. Ce facteur est également marqué par la présence des sels nutritifs (nitrates). Tous ces éléments proviennent des effluents issus des activités domestiques, artisanales et industrielles donc des activités anthropogéniques. Le facteur F1 explique une pollution d'origine industrielle et domestique.

**Tableau IV.** Corrélations facteurs variables

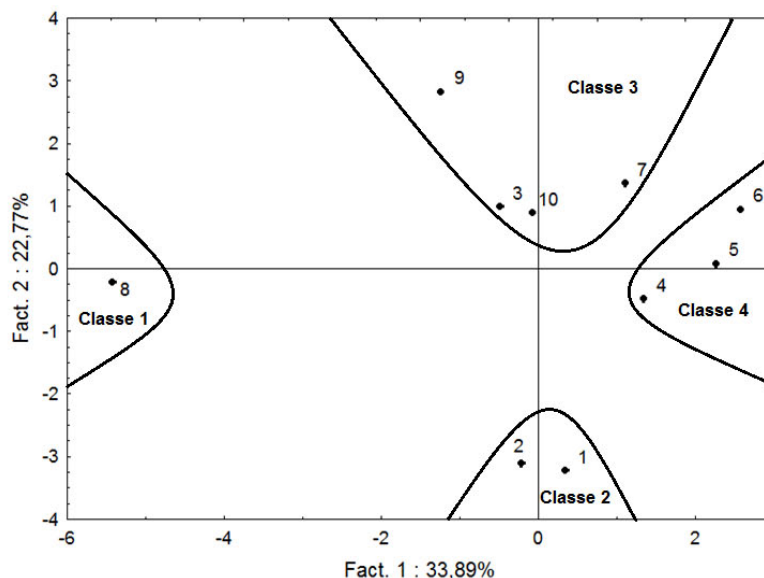
	<b>Fact. 1</b>	<b>Fact. 2</b>	<b>Fact. 3</b>
<b>Sal</b>	-0,775	-0,542	-0,220
<b>CE</b>	-0,046	-0,860	-0,272
<b>pH</b>	0,299	-0,122	-0,829
<b>T°C</b>	-0,112	-0,418	0,709
<b>O<sub>2</sub></b>	0,754	-0,530	-0,195
<b>Eh</b>	-0,199	-0,792	0,354
<b>Fe<sup>2+</sup></b>	-0,867	-0,011	-0,069
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	0,377	0,026	0,747
<b>Mn</b>	0,779	-0,363	0,062
<b>Ni</b>	-0,828	-0,376	0,332
<b>Zn</b>	-0,139	0,525	0,282
<b>Cd</b>	0,604	-0,306	0,215
<b>Cu</b>	-0,563	-0,419	0,506
<b>Pb</b>	0,574	-0,644	0,076
<b>Cr</b>	-0,305	-0,526	-0,641
<b>Co</b>	-0,895	0,050	-0,226

**Tableau V.** Matrice de corrélation entre les variables

	<b>Sal</b>	<b>CE</b>	<b>pH</b>	<b>T°C</b>	<b>O<sub>2</sub></b>	<b>Eh</b>	<b>Fe<sup>2+</sup></b>	<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<b>Mn</b>	<b>Ni</b>	<b>Zn</b>	<b>Cd</b>	<b>Cu</b>	<b>Pb</b>	<b>Cr</b>	<b>Co</b>
<b>Sal</b>	1,00															
<b>CE</b>	0,49	1,00														
<b>pH</b>	0,02	0,35	1,00													
<b>T°C</b>	0,10	0,24	-0,45	1,00												
<b>O<sub>2</sub></b>	-0,26	0,46	0,30	-0,08	1,00											
<b>Eh</b>	0,41	0,76	-0,30	<b>0,68</b>	0,24	1,00										
<b>Fe<sup>2+</sup></b>	<b>0,80</b>	-0,12	-0,23	-0,07	-0,63	-0,05	1,00									
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	-0,41	-0,36	<b>-0,69</b>	0,27	0,26	0,10	-0,23	1,00								
<b>Mn</b>	-0,47	0,18	0,19	0,20	<b>0,80</b>	0,16	-0,69	0,33	1,00							
<b>Ni</b>	<b>0,79</b>	0,29	-0,39	0,55	-0,55	0,55	<b>0,71</b>	-0,14	-0,53	1,00						
<b>Zn</b>	-0,27	-0,25	-0,31	-0,09	-0,44	-0,10	-0,10	0,12	-0,60	0,04	1,00					
<b>Cd</b>	-0,22	0,03	0,06	-0,01	0,53	-0,03	-0,29	0,44	0,41	-0,29	-0,17	1,00				
<b>Cu</b>	0,57	0,17	-0,48	0,44	-0,35	0,52	0,53	0,16	-0,23	<b>0,76</b>	-0,07	0,06	1,00			
<b>Pb</b>	-0,02	0,46	0,28	0,14	<b>0,69</b>	0,28	-0,35	0,30	0,50	-0,15	-0,28	<b>0,82</b>	0,07	1,00		
<b>Cr</b>	<b>0,69</b>	<b>0,62</b>	0,32	-0,37	0,31	0,28	0,36	-0,39	-0,15	0,16	-0,32	-0,13	0,03	0,13	1,00	
<b>Co</b>	<b>0,69</b>	0,00	-0,22	-0,13	-0,56	0,08	<b>0,79</b>	-0,41	-0,59	0,57	-0,07	-0,68	0,38	<b>-0,70</b>	0,46	1,00



a) Espace des variables du plan factoriel F1-F2



b) Espace des unités statistiques du plan factoriel F1-F2

**Figure 7.** Analyse en composantes principales des eaux du village d'Abia Koumassi dans le plan factoriel F1- F2

Le facteur F2 (22,77%) est déterminé par les variables Eh, T° C, CE et Cr. Ce groupe de paramètres montre que la minéralisation des eaux est contrôlée par le Cr. Cet élément provient des effluents issus des activités industrielles. Le facteur F2 explique donc une minéralisation d'origine industrielle.

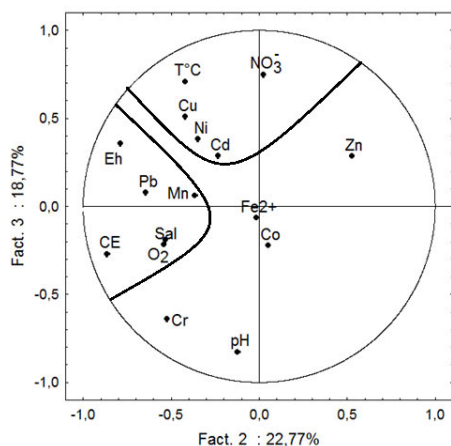
A l'analyse de l'espace des unités statistiques du plan factoriel F1-F2, les eaux du village d'Abia Koumassi se regroupent en quatre familles. Le premier regroupement prend en compte le point d'eau 8 qui présente une forte conductivité électrique, avec de fortes teneurs en  $\text{Fe}^{2+}$ , Mn, Ni et Cr. Ce point d'eau est en effet, situé dans une ancienne décharge de fer qui participe à l'enrichissement en fer de l'eau.

La classe 2 contient les eaux de la lagune Ebrié qui sont soumises à une influence des activités urbaines et industrielles. Elles présentent des fortes teneurs en éléments métalliques traces tels que Cr ( $0,115 \text{ mg.L}^{-1}$ ) et Co ( $0,649 \text{ mg.L}^{-1}$ ).

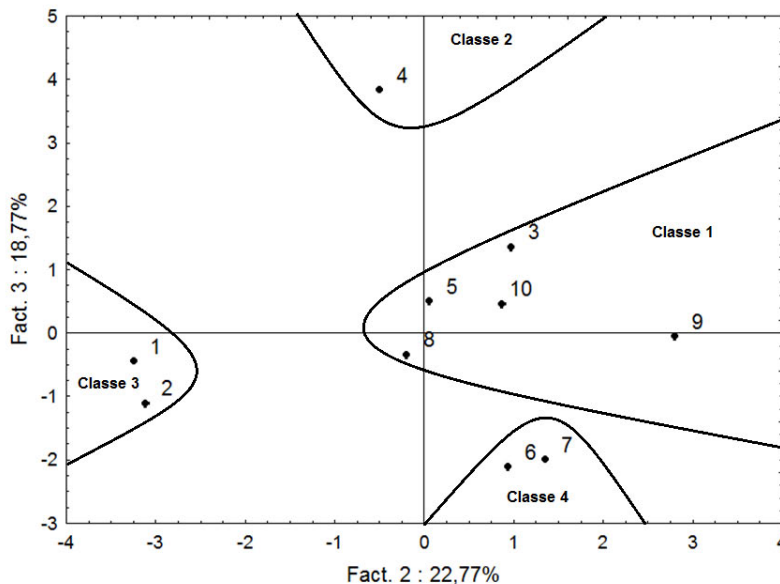
La classe 3 regroupe les points d'eau 4, 5, 6, 7 et 10 correspondant aux eaux issues d'une minéralisation dominée par la pollution nitratée d'origine domestique. Le dernier regroupement prend en compte les points d'eau 3 et 9.

La seconde analyse des résultats de l'ACP a été réalisée dans l'espace des variables du plan factoriel F2-F3 qui représente 41,54% de la variance exprimée (figure 8). Ce plan factoriel montre que le facteur F2 est déterminé par les variables telles que Eh, Pb, Mn, CE Sal. et O<sub>2</sub> et explique une pollution d'origine industrielle. Le facteur F3 est défini par NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cu, Ni, Cu et T°. Ce facteur explique une pollution organique d'origine domestique.

Dans l'espace des unités statistiques, quatre classes de points d'eau se retrouvent. Le premier regroupement prend les points d'eau 3 et 9 à fortes teneurs en nitrates. La deuxième classe contient le point d'eau 4, à forte teneur en Ni et avec une forte minéralisation. La troisième classe prend en compte les eaux de la lagune Ebrié. La dernière classe contient les points d'eau 5, 6, 7, 8 et 10 qui sont des eaux de puits riches en Co, Mn et Fe<sup>2+</sup>.



a) Espace des variables du plan factoriel F2-F3



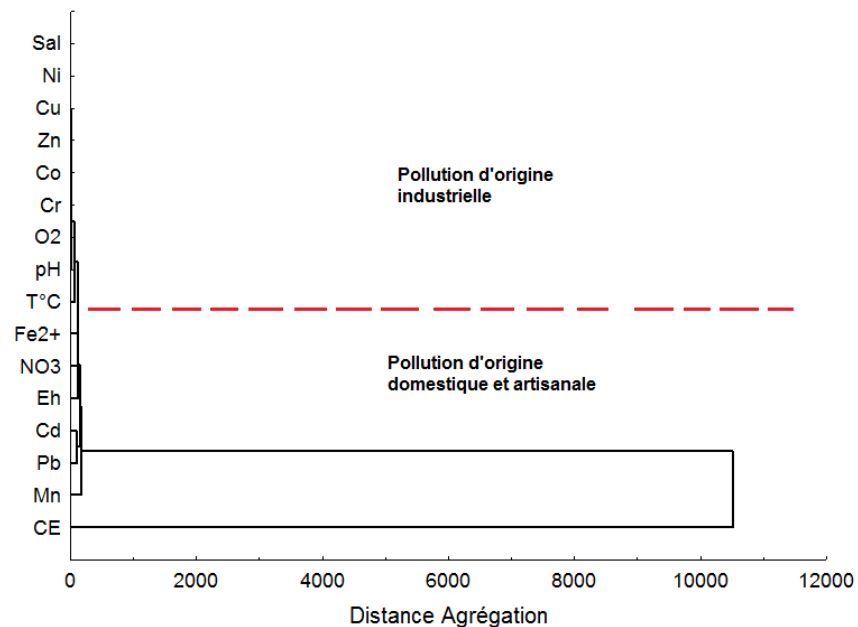
b) Espace des unités statistiques du plan factoriel F2-F3

**Figure 8.** Analyse en composantes principales des eaux du village d'Abia Koumassi dans le Plan factoriel F2- F3

### Classification Hiérarchique Ascendante (CAH)

Les résultats de la Classification Hiérarchique Ascendante (CAH) sont présentés par la figure 9. Celle-ci montre que les éléments traces métalliques : Ni, Cd, Zn, Cu, Cr et Co, sont très rapprochés entre eux et proches de Sal. Cela montre la forte participation de ces variables dans la minéralisation des eaux de la zone d'étude. Le dendrogramme de la figure 9 met en évidence deux grands

regroupements des différentes des variables. Il s'agit pour le premier regroupement de Sal., Ni, Cu, Zn, Co, Cr, O<sub>2</sub>, pH et T°. Ce groupe prend en compte tous les ETM qui ont une origine industrielle et artisanale. Le deuxième regroupement contient les paramètres tels que Fe<sup>2+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, pH, Eh, Cd, Pb, Mn et CE. Ces variables mettent en évidence une pollution anthropique d'origine domestique. Les résultats de la Classification Hiérarchique Ascendante montre que la minéralisation des eaux de la zone d'étude est d'origine multiple : domestique, industrielle et artisanale.



**Figure 9.** Dendrogramme des paramètres physico-chimiques des eaux d'Abia Koumassi

## DISCUSSION

L'échantillonnage des eaux du village d'Abia Koumassi, majoritairement constitué d'eaux de puits et de deux échantillons d'eaux de la lagune Ebrié est très minéralisé. Les eaux présentent par endroits des conductivités élevées ; c'est le cas, notamment, du puits 6 situé sur une ancienne décharge de fer (1310 S/cm). L'eau de ce puits est en contact avec les rejets de fer de la décharge qui participent à sa pollution. Les fortes conductivités enregistrées dans le cadre de cette étude sont caractéristiques des eaux superficielles en zones urbaines et péri-urbaines. Dans ces zones, les populations n'ont pas toutes accès à un système d'assainissement amélioré. Ces problèmes ont également été observés par AHOUSSE et *al.* (2010) au niveau des eaux de puits de la ville d'Abidjan, TANDIA et *al.* (1999) au niveau des eaux souterraines de la zone péri-urbaine de la ville Dakar au Sénégal. L'étude statistique (ACP et CHA) a montré que la minéralisation des eaux du village d'Abia Koumassi est influencée par une pollution d'origine anthropique. En Côte d'Ivoire, les récentes études réalisées par COULIBALY et *al.* (2008) sur la lagune Ebrié ont mis en évidence de fortes teneurs en ETM dans les sédiments de surface de cette lagune. Il s'agit notamment de Ni, Cr, Pb, Fe, Cd, et Cu. Selon ces auteurs, ces concentrations appartiennent aux classes 2-3 et les dépôts varient de modérément à fortement pollués. Ces études ont montré que de 1985 à 2005, les sédiments de la lagune Ebrié ont subi une considérable augmentation en teneur en ETM. Pour ces auteurs, cette pollution est liée à l'influence de l'urbanisation, de l'industrialisation et de l'évolution démographique. Les résultats obtenus dans cette étude sont en accord avec ceux obtenus par SORO et *al.* (2009) sur les rejets en lagune Ebrié. Ces auteurs ont mis en évidence des fortes teneurs de métaux lourds (Zn, Cu, Co, Cd) dans les sédiments des sites de rejet des eaux usées dans la lagune Ebrié. Une étude menée par AHOUSSE et *al.* (2010) sur les eaux souterraines des nappes phréatiques du Quaternaire de la ville d'Abidjan a montré de fortes teneurs en éléments métalliques tels que Pb, Cu, Mn et Zn dans les eaux de la ville. Ces teneurs sont largement supérieures à la valeur guide de l'OMS (2008), pour une eau de boisson. Pour ces auteurs, la pollution métallique des eaux est également liée aux activités anthropiques telles que les industries, l'artisanat et les activités domestiques. Selon GUILLEMIN &

ROUX (1992), les eaux de ruissellements en milieu urbain peuvent aussi constituer des sources de minéralisation. En effet, les eaux pluviales sont unanimement reconnues comme pouvant être le vecteur d'importantes quantités de pollutions, en lessivant sur leur passage métaux (Pb, Ni, Cr, Zn, Cd), sels, hydrocarbures, engrais, pesticides et autres produits ou déchets en provenance de routes et de parkings ou en suspension dans l'air (GUILLEMIN & ROUX, 1992).

Ces eaux de pluies s'infiltrent dans le sol pour atteindre ensuite les nappes superficielles ou bien rejoignent les eaux de surface comme c'est le cas de la lagune Ebrié. Dans les grandes villes d'Afrique, les études menées dans le domaine relatif à l'influence des activités anthropiques sur la qualité des ressources en eau montrent que celles-ci (eaux de surface et eaux souterraines) sont confrontées à une nouvelle menace qui est la pollution métallique. Ainsi, les travaux d'OLOLADE & AJAYI (2009) sur les eaux de la principale rivière de l'Etat d'Ondo au Nigéria ont révélé la présence de fortes teneurs de Cd, Cu, Pb et Zn, supérieures aux normes OMS dans les eaux et les sédiments de cette rivière. Selon ces auteurs, l'origine des métaux dans ce milieu est également liée aux activités anthropiques notamment l'agriculture et les activités commerciales. Au Maroc, les travaux de BEN BOUIH et al. (2005), BLIDI et al. (2007), EL ASSLOUJ et al. (2007), HAKOM et al. (2001), cités par BEN BOUIH et al. (2005) ont également mis en évidence de fortes concentrations en ETM dans les sédiments du lac Fouarat. Pour ces auteurs, la source de cette pollution ne s'éloigne pas de celle identifiée dans le cadre de cette étude. Dans la plaine d'El Ma El Abiod d'Algérie, ROUABHIA et al. (2004) ont signalé que les eaux souterraines sont également menacées par de nombreux foyers de pollution d'origine anthropique tels que l'urbanisation, l'industrialisation, l'élevage et les décharges sauvages. En Iran, FATEMEH et al (2012) ont montré que les eaux de la rivière Aras à Ardabil étaient polluées par les métaux lourds tels que Zn, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, Cd. La pollution métallique des eaux est d'origine anthropique et issue des rejets d'ordures ménagères, du lessivage agricole et des rejets liés aux activités industrielles. A ces sources s'ajoute également une pollution métallique issue des activités artisanales telles que les garages de mécanique, les ateliers de traitement de surface des véhicules par la peinture et les stations de distributions de produits pétroliers.

## CONCLUSION

L'étude de la caractérisation des éléments métalliques traces dans les eaux du village d'Abia Koumassi a permis de mettre en évidence les différentes teneurs en ETM des eaux du village. Les résultats des analyses chimiques des eaux montrent la présence dans celles-ci d'ETM tels que Ni, Cd, Mn et Fe<sup>2+</sup> à des teneurs relativement supérieures à celles préconisées par l'OMS en 2008 pour une eau de boisson. Il s'agit respectivement de Ni = 0,07 mg.L<sup>-1</sup>, Cd = 0,003 mg.L<sup>-1</sup>, Mn = 0,4 mg.L<sup>-1</sup> et Fe = 0,3 mg.L<sup>-1</sup>. Les études statistiques multivariées (Analyse en Composantes Principales et Classification Hiérarchique Ascendante) révèlent que ces éléments métalliques traces issus d'une influence anthropique d'origine domestique, artisanale et industrielle pollue les eaux du village d'Abia Koumassi. Celle-ci participe à la dégradation de la qualité des eaux de la dite localité. La consommation de ces eaux de mauvaise qualité constitue un risque sanitaire pour les populations du village.

## REFERENCES

- AGHUI & BIEMI 1984. Géologie et Hydrogéologie des nappes de la région d'Abidjan et risques de contaminations. *Annales de l'Université de Côte d'Ivoire*, série C (Sciences), **20** : 313-347.
- AHOUSSE K. E., SORO N., SORO G., OGA M. S. & ZADE 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.
- AHOUSSE K. E., SORO N., KOUASSI A. M, SORO G. KOFFI Y. B. & ZADE S. P. 2010. Application des méthodes d'analyses statistiques multivariées à l'étude de l'origine des Métaux lourds (Cu<sup>2+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup> et Pb<sup>2+</sup>) dans les eaux des nappes phréatiques de la ville d'Abidjan. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **4**, (5): 1753-1765.
- BIEMI J. 1992. Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants Subsahariens 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 de Doctorat d'Etat, Université Nationale de Côte d'Ivoire, 480 p.

- COULIBALY A. S., MONDÉ, 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.
- DONGO K, KOUAMÉ KF, KONÉ B, BIÉMI J, TANNER M & CISSÉ G. 2008. Analyse de la situation de l'environnement sanitaire des quartiers défavorisés dans le tissu urbain de Yopougon à Abidjan, Côte d'Ivoire. *Vertigo*, 8, (3): 1-11.
- FATEMEH N, AMIRHESAM H., MASOUD M., ABDOREZA K., NEMATOLLAH K. & ALIAKBAR I. 2012. Heavy Metal Distributions in Water of the Aras River, Ardabil, Iran. *Journal of Water Resource and Protection*, 4: 73-78.
- BEN BOUIH H., NASSALI H., LEBLANS M. & SRHIRI A. 2005. Contamination en métaux traces des sédiments du lac Fouarat (Maroc). *Afrique Science*, 01, (1) : 109 – 125.
- BLIDI S. E., FEKHAOUI M, SERGHINI A., EL ABIDI A. & DRISSI L. 2007. Comportement des éléments traces métalliques dans l'agrosystème rizière du Gharb (Maroc). *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Science de la vie*, 29: 63-70.
- EL ASSLOUIJ J., KHOLTEI S., EL AMIRA-PAAZA N. & HILALI A. 2007. Impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines de la communauté Mzamza (Chaouia, Maroc). *Revue des Sciences de l'Eau*, 20, (3) : 309- 321.
- GUILLEMIN C. & ROUX J. C. (1992). La pollution des eaux souterraines. Manuels et Méthodes n° 23, Editions BRGM, 262 p.
- KOUASSI A. M., YAO K. A., AHOUSSE K. E., SEKI L. C., YAO N. A. & BIEMI J. 2010. Caractérisation hydrochimique des aquifères fissurés de la région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 4, (5) : 1816-1838.
- KOUAME K. J. 2007. Contribution à la Gestion intégrée des Ressources en Eaux (GIRE) du District d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire) : Outils d'aide à la décision pour la prévention et la protection des eaux souterraines contre la pollution. Thèse d'Université de Cocody, Abidjan, 227 p.
- 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.
- OLOLADE I. A. & AJAYI A. O. 2009. Contamination profile of major rivers along the highways in Ondo State, Nigéria. *Journal of Toxicology and Environmental Sciences*, 1, (3): 38-53.
- OMS 2008. Guidelines for Drinking-water Quality. Third edition, incorporating the first and second Addenda, Recommendations, Geneva, Volume 1, p 515.
- OGA M. S. 1998. Ressources en eaux souterraines dans la région du Grand Abidjan (Côte d'Ivoire) : Approche Hydrochimique et Isotopique. Thèse d'Université d'Orsay, Paris, France, 311 p.
- ROUABHIA A, BAALI F. KHERICI N & DJABRI L. 2004. Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El Ma El Abiod (Algérie). *Sécheresse*, 15, (4) : 347-352
- SAVANE I. & SORO N. 2001. Caractérisation chimique et isotopique des eaux souterraines du Nord-Ouest de la Côte : recharge des aquifères discontinus de la région d'Odienné. *Africa Géoscience Review*, 8, (4) : 379-390.
- SORO G 2010. Evaluation quantitative et qualitative des ressources en eau souterraines dans la région des lacs (Centre de la Côte d'Ivoire) : hydrogéologie et hydrochimie des aquifères discontinus du District de Yamoussoukro et du département de Tiébissou. Thèse d'Université de Cocody, Abidjan, Côte d'Ivoire, 250 p.
- SORO G., METONGO S. B., SORO N., AHOUSSE K. E., KOUAME KOFFI F. ZADE S. G. P. & SORO T. 2009. Métaux lourds (Cu, Cr, Mn et Zn) dans les sédiments de surface d'une lagune tropicale africaine : cas de la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, 3, (6): 1408-1427.
- SORO N., OUATTARA L., DONGO K., KOUADIO K. E., AHOUSSE K. E., SORO G., OGA Y. M.-S., SAVANE I. & BIEMI 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) : 364-384.
- TANDIA A. A., DIOP E. S. & GAYE C. B. (1999). Pollution par les nitrates des nappes phréatiques sous environnement semi-urbain non assaini : exemple de la nappe de Yeumbeul, Sénégal. *Journal of African Earth Sciences*, 29, (4) : 809-822.
- TRAVI Y. & MUDRY J. 1997. Méthode pour l'évaluation et la gestion du risque nitrate dans les aquifères du socle de la zone sahélienne d'Afrique de l'Ouest. *Revue d'Hydrogéologie*, 1: 13-21.
- YIDANA S. M. 2010. Groundwater classification using multivariate statistical methods : Southern Ghana. *Journal of African Earth Sciences*, 57: 455-469.
- 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.

