



Application des méthodes d'analyses statistiques multivariées à l'étude de l'origine des métaux lourds (Cu^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} et Pb^{2+}) dans les eaux des nappes phréatiques de la ville d'Abidjan

Ernest Kouassi AHOUSSE^{1*}, Nagnin SORO¹, Amani Michel KOUASSI²,
Gbombélé SORO¹, Yao Blaise KOFFI¹ et Sompohi Pacôme ZADE¹

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 de Cocody, 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

* Auteur correspondant, E-mail : ahoussi@gmx.fr

RESUME

L'étude des métaux lourds dans les eaux des nappes phréatiques de la ville d'Abidjan a été réalisée à partir de 30 puits privés. Les analyses chimiques réalisées sur les eaux souterraines ont été traitées en utilisant une combinaison de méthodes statistiques. Une première approche qui est basée sur l'utilisation de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) et une seconde représentée par l'Analyse en Composantes Principales (ACP). La combinaison de ces deux méthodes a apporté des connaissances sur l'origine de la minéralisation des eaux. Les eaux souterraines sont acides, avec un pH moyen environ égal à $6 \pm 0,21$. Les teneurs en Mn^{2+} , Cu^{2+} et Zn^{2+} sont faibles pour l'ensemble des points d'eau étudiés. Elles sont largement inférieures aux normes admissibles par l'OMS qui sont respectivement de $0,05 \text{ mg.L}^{-1}$; $0,05 \text{ mg.L}^{-1}$ et 5 mg.L^{-1} . Les eaux souterraines présentent des teneurs en métaux lourds qui varient entre 0 et $2,8 \text{ mg.L}^{-1}$ pour le Pb^{2+} . La majeure partie des eaux étudiées a des teneurs en plomb supérieures à la norme admissible par l'OMS ($0,1 \text{ mg.L}^{-1}$). Les métaux lourds présents dans les eaux souterraines sont issus des activités industrielles et artisanales. Cette étude montre également que les eaux des nappes phréatiques contiennent d'importantes quantités de plomb et sont de ce fait polluées.

© 2010 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés : Analyse en Composantes Principales, Classification Ascendante Hiérarchique, Eaux souterraines, pollution

INTRODUCTION

Les eaux souterraines issues des nappes captives et superficielles sont des ressources en eaux exploitées par l'homme pour divers usages (Prasad et Narayana, 2004). La composition chimique d'une eau issue du milieu naturel dépend généralement de la

nature géologique du sol d'où elle provient et aussi des substances réactives qu'elle rencontre lors de son écoulement. Ainsi la composition quantitative et qualitative de l'eau souterraine en matières en suspension et dissoutes, de nature minérale ou organique, détermine sa qualité (Jain et al., 2005). Cette

© 2010 International Formulae Group. All rights reserved.

qualité peut cependant être altérée lorsque des substances indésirables voire toxiques entrent en contact avec la nappe. Dans les pays en voie de développement l'utilisation intensive des ressources naturelles et l'accroissement des activités anthropiques ont engendré de sérieux problèmes du fait d'un manque de protection de l'environnement (Matini et al., 2009). Aujourd'hui, de nombreuses grandes villes africaines connaissent une croissance démographique et une urbanisation galopante et anarchique qui engendrent de nombreux problèmes environnementaux. Parmi ces problèmes, nous pouvons évoquer la pollution des ressources en eau (Soro et al., 2009 ; Ahoussi et al., 2010). La ville d'Abidjan à l'instar des autres villes d'Afrique connaît aujourd'hui une croissance démographique et une industrialisation rapide. Cette ville portuaire rassemble les principales activités industrielles du pays. Les nombreuses activités industrielles et domestiques constituent sans doute un véritable danger pour l'environnement urbain. Dans cette localité, les différents quartiers ne disposent pas tous de dispositifs adéquats d'évacuation des eaux usées (Kouamé, 2007). Le système d'assainissement de la ville d'Abidjan est insuffisant et présente beaucoup de pertes, avec un taux de raccordement des ménages au réseau d'assainissement resté limité à 29%. Les déchets non collectés (45%) se retrouvent directement dans la nature entraînant un risque de détérioration de la qualité des eaux souterraines. Les nappes phréatiques de la ville d'Abidjan sont soumises à de nombreux problèmes de pollution. Les études menées par Ahoussi et al. (2009) sur les eaux de ces nappes, ont mis en évidence des teneurs importantes de nitrates, de coliformes fécaux et de plomb.

Les métaux lourds sont des facteurs polluants importants pour les écosystèmes aquatiques (Coulibaly et al., 2009) à cause de leur toxicité et de leur capacité à s'accumuler dans le biota. Selon ces auteurs, les métaux lourds qui résultent des activités anthropiques ne sont pas biodégradables. Les pollutions d'origine métalliques constituent un des

risques majeurs dans le monde actuel (Soro et al., 2009). Le développement des activités industrielles, notamment, pétrolières en Côte d'Ivoire au niveau de la ville d'Abidjan n'est pas sans risque de pollution pour les eaux souterraines de cette ville. Les nappes phréatiques sont alimentées par une infiltration directe des eaux de pluies. L'infiltration des eaux pluviales est favorisée par un important coefficient d'infiltration et un niveau piézométrique faible pour les nappes du Quaternaire (Aghui et Biémi, 1984). Il se trouve, cependant qu'un grand nombre de la population, surtout celle de la zone Sud de la ville d'Abidjan utilise les eaux de ces nappes superficielles pour leurs besoins domestiques. La présente étude a pour objectif de déterminer l'origine des métaux lourds présents dans les eaux des nappes phréatiques de la ville d'Abidjan. Ce travail permettra en outre de voir si les populations qui consomment ces eaux courent un risque sanitaire.

MATERIEL ET METHODES

Présentation de la zone d'étude

La ville d'Abidjan est située au Sud de la Côte d'Ivoire, entre les latitudes 5°00' et 5°30' N et les longitudes 3°50' et 4°10' W. Elle est composée de dix communes et s'étend sur une superficie de 57 735 hectares dont 8 981 hectares de lagune, soit 16% de la superficie (Figure 1). Abidjan, représente la capitale économique du pays et regroupe la majeure partie des activités industrielles. La température moyenne mensuelle mesurée à la station d'Abidjan au cours de la période 1984-2000 varie entre 24 °C et 30 °C, avec une valeur moyenne de 26 °C. L'insolation moyenne relevée à Abidjan pendant la période 1984-2000 dure en moyenne 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 (Hr) varie entre 75% et 80%, avec une moyenne de 83% pour la période 1984 à 2000. Elle reste supérieure à 70% toute l'année. La pluviométrie moyenne interannuelle est supérieure à 2000 mm. Le climat est de type équatorial de transition avec

4 saisons dont 2 saisons de pluies (d'avril à juillet et d'octobre à novembre) et 2 saisons sèches (d'août à septembre et de décembre à mars).

La géologie de la ville d'Abidjan se confond à celle du bassin sédimentaire côtier ivoirien, qui s'étend sur 400 km de long et 40 km de large. Au Nord, les terrains géologiques sont constitués des sédiments du Tertiaire représentés par les sables, les argiles et les grès ferrugineux. Les vases et les sables lessivés sont rencontrés vers les bordures lagunaires. Au Sud, ce sont les sédiments du Quaternaire constitués de sables des cordons marins, de sables, d'argiles et de grès ferrugineux avec des vases et des sables lessivés. Du point de vue hydrogéologique, sur ce bassin, sont dénombrés trois principaux aquifères. L'aquifère du Quaternaire contient la nappe la plus vulnérable de la ville d'Abidjan. Cette nappe, très proche de la surface du sol, a une épaisseur qui varie entre 1 et 20 m. Plus en profondeur, on rencontre celui du Continental Terminal qui abrite la nappe d'Abidjan, captée par la Société de Distribution d'Eau de Côte d'Ivoire (SODECI) et destinée à l'alimentation en eau potable de la population abidjanaise. Dans cette nappe, l'eau s'y trouve à des profondeurs décroissantes du Nord au Sud. Après l'aquifère du Continental Terminal on rencontre l'aquifère du Maestrichtien situé à 200 m de profondeur. Du point de vue tectonique, le bassin sédimentaire est traversé d'Est-Ouest par la faille des lagunes. Cette faille présente un pendage sud et un rejet pouvant atteindre 3500 m.

Du point de vue des activités anthropiques, la ville d'Abidjan abrite de nombreuses activités artisanales et industrielles. Les activités de l'abattoir, de la Société Ivoirienne de Raffinage (SIR), des savonneries (Unilever) et des tanneries artisanales rejettent les eaux usées dans les baies de la ville (Soro et al., 2009). L'estimation de la charge polluante de ces rejets révèle que les industries agroalimentaires et textiles sont les sources dominantes de pollutions industrielles et par

conséquent les plus polluantes (Kouassi et al., 1995). Selon ces auteurs, ces eaux usées sont composées surtout de substances toxiques (acides, huiles minérales, pigments des industriels textiles, carburants, peintures, pesticides, glycerine de savonneries et arsenic) et de métaux lourds (chrome, plomb, zinc....) provenant des ateliers métallurgiques, de raffineries et de tannage de peaux artisanales.

Méthodes d'échantillonnage et d'analyse des eaux

Une campagne d'échantillonnage des eaux des nappes phréatiques a été organisée en août 2000 dans la ville d'Abidjan. Cette étude a été réalisée à partir des données collectées sur 30 puits captant les nappes phréatiques de la ville d'Abidjan (Figure 2). Les paramètres physiques tels que la température, le pH et la conductivité électrique (CE) de l'eau ont été mesurés *in situ* à l'aide d'un pH-mètre Knick Portatest et d'un conductimètre WTW 330.

Les échantillons d'eau ont été recueillis dans des bouteilles en polyéthylène et transportés dans une glacière à 4 °C au laboratoire du Centre de Recherche Océanologique (CRO) pour l'analyse chimique. Les ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- et NO_3^-) et les ions métalliques tels que le fer (Fe^{2+}), le cuivre (Cu^{2+}), le manganèse (Mn^{2+}), le zinc (Zn^{2+}) et le plomb (Pb^{2+}) y ont été également dosés. Ces analyses ont été réalisées par la méthode d'absorption atomique à la flamme à l'aide d'un spectrophotomètre d'absorption atomique de type VARIAN AA-1275. Les sels nutritifs (NH_4^+ , NO_2^- et PO_4), quant à eux, ont été analysés par colorimétrie à l'aide d'un spectrophotomètre de type BECKMAN DU®-64.

Méthodes statistiques de traitement des données

Les résultats des analyses ont été traités en utilisant une combinaison de méthodes statistiques. Une première approche statistique a été basée sur l'utilisation de la Classification

Ascendante Hiérarchique (CAH) et une seconde représentée par l'Analyse en Composantes Principales (ACP).

La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) est un outil puissant pour analyser des données de la chimie d'eau et pour la formulation de modèles géochimiques (Meng et Maynard, 2001 in Yidana, 2007). C'est un système de classification qui utilise la distance euclidienne pour des mesures de similitude et la méthode de la tutelle pour lien qui produit la classification la plus distinctive où chaque membre dans un groupe est plus semblable à ses collègues qu'à n'importe quel membre à l'extérieur du groupe (Güler et al., 2002).

L'approche de la statistique descriptive consiste à une Analyse en Composantes Principales (ACP) sur des variables centrées réduites. Cette analyse a pour but de suivre l'évolution chimique des eaux souterraines. L'ACP est une méthode statistique multidimensionnelle descriptive utilisable comme outil d'aide à l'interprétation d'une matrice de données (Travi et Mudry, 1997). Cette analyse permet de synthétiser et de classer un nombre important de données afin d'en extraire les principaux facteurs qui sont à l'origine de l'évolution simultanée des variables et de leurs relations propres (Biémi, 1992). L'ACP permet de mettre en évidence les ressemblances et la position graphique que présenteraient deux ou plusieurs variables chimiques au cours de leur évolution. Son utilisation permet de réduire et d'interpréter les données sur un espace réduit (Lagarde, 1995). L'application des méthodes exploratoires multivariées (Analyse Factorielle et la Classification Hiérarchique Ascendante) comme l'ont indiqué Marin et al. (2009) permet d'identifier les paramètres les plus pertinents qui décrivent la qualité des eaux souterraines et de montrer leur variabilité. L'ACP et le CAH comportent 30 descripteurs et 17 variables qui sont : la minéralisation totale (MT), le pH et les ions tels que HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , Fe^{2+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} et Pb^{2+} . Elle a été réalisée à l'aide du

logiciel STATISTICA 6.0. La combinaison de toutes les méthodes utilisées dans cette étude permet de connaître l'origine des métaux lourds dans les eaux des nappes phréatiques de la ville d'Abidjan.

RESULTATS

Les résultats des analyses chimiques des eaux souterraines de la ville d'Abidjan sont consignés dans le Tableau 1. L'analyse de ces résultats montre que les eaux souterraines de la zone d'étude sont moyennement minéralisées, avec une minéralisation totale qui varie entre 96 et 1555,70 mg.L^{-1} , pour une moyenne de $658,86 \pm 69,14 \text{ mg.L}^{-1}$. La conductivité électrique (CE) des eaux varie entre 155 $\mu\text{S/cm}$ et 2350 $\mu\text{S/cm}$, avec une moyenne $939,13 \pm 95,45 \mu\text{S/cm}$. Les eaux sont acides, avec un pH qui varie entre 3,9 et 7,7 pour une moyenne de $6 \pm 0,21$. Ces eaux présentent de fortes teneurs en sels nutritifs dont les composés azotés, avec des teneurs de 196,2 mg.L^{-1} , 2,8 mg.L^{-1} et 32,2 mg.L^{-1} respectivement pour les nitrates, les nitrites et l'ammonium.

En ce qui concerne les métaux lourds objet du présent travail (le plomb, le cuivre, le fer et le manganèse), les teneurs maximales observées dans les eaux souterraines sont, respectivement de 2,8 mg.L^{-1} , 0,14 mg.L^{-1} , 0,14 mg.L^{-1} et 1,15 mg.L^{-1} .

Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

La Figure 3 présente le dendrogramme issu de l'analyse de la Classification Ascendante Hiérarchique des données. L'analyse hiérarchique des données chimiques met en évidence trois principaux regroupements des variables. Le premier groupe comprend les variables : pH, Fe^{2+} , Mn^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} , NO_2^- , Mg^{2+} et NH_4^+ . Ce groupe traduit un phénomène de pollution d'origine artisanale et industrielle du fait de la présence des métaux lourds dans ce regroupement. Le second groupe est constitué de K^+ , SO_4^{2-} , Ca^{2+} et Na^+ . Ce groupe rassemble l'ensemble des puits situés en bordure de la lagune Ebrié. Il met en évidence

une intrusion saumâtre dans les eaux souterraines. Le troisième groupe, constitué de NO_3^- , Cl^- , HCO_3^- et de MT représente la contribution des apports superficiels au chimisme des eaux souterraines. Ce regroupement met en évidence l'infiltration superficielle des eaux météoriques.

Analyse en Composantes Principales (ACP)

Les résultats obtenus avec l'Analyse en Composantes Principales (ACP) sont reportés dans les Tableaux 2, 3, et 4. Cette analyse a permis d'extraire trois principaux facteurs dont la somme des variances exprimées est de 83,20% (Tableau 3), ce qui reste supérieur à 70%. Ces facteurs rendent véritablement compte de la variance exprimée et expliquent les informations recherchées. La représentation à l'aide de ces trois facteurs rend compte de la structure des nuages de points de manière satisfaisante.

L'affinité qui existe entre toutes les variables prises deux à deux est donnée par la matrice de corrélation (Tableau 3).

Le Tableau 4 montre des corrélations importantes entre la minéralisation totale (MT) et la majeure partie des variables. Ces fortes corrélations entre ces variables montrent la similarité des phénomènes à l'origine de la mise en circulation de ces ions dans les eaux. Les résultats de l'ACP permettent de choisir les différents facteurs nécessaires à l'interprétation des différentes données. L'analyse des graphes de l'espace des variables, dans le plan factoriel F1-F2

(Figure 3) montre que ce plan représente à lui seul 67,33% des informations recherchées, soit de la variance exprimée. Le cercle de communauté (Figure 4) montre que le facteur F1, le plus important est déterminé par MT, Fe^{2+} , Mn^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Pb^{2+} , HCO_3^- et Cl^- . Ce regroupement est dominé par les métaux lourds qui proviennent de la pollution urbaine et industrielle. Le facteur 1 met en évidence une pollution métallique d'origine anthropique liée aux activités industrielles, artisanales et domestiques.

Le facteur F2 est déterminé par les ions SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+ . Cette minéralisation est contrôlée par un processus rapide et facile de production d'ions dans l'aquifère du bassin sédimentaire. Le phénomène mis en évidence est l'intrusion des eaux saumâtres dans l'aquifère.

Le facteur F3 est caractérisé par NO_3^- , NH_4^+ et NO_2^- . La présence des composés azotés dans une eau souterraine rend compte des conditions du milieu et leur influence sur les eaux d'infiltration. Le NO_3^- est produit à la surface du sol puis entraîné, avec les eaux d'infiltration en profondeur dans les nappes phréatiques. La présence des composés azotés dans les eaux des nappes phréatiques, témoigne d'une pollution organique issue de la dégradation complète ou incomplète de la matière organique par les microorganismes dans les couches superficielles du sol. Le NO_3^- est un bon indicateur des apports superficiels. Le facteur F2 exprime donc une pollution organique d'origine anthropique.

Tableau 1 : Résultats des analyses chimiques sur les eaux de puits de la ville d'Abidjan (mg.L^{-1}).

Variables	Nombre d'échantillons	Min.	Max.	Moyenne	Ecart type	Erreur Standard sur la Moyenne (ESM)
pH	30	3,86	7,70	6,01	1,14	0,21
CE	30	155,00	2350,00	938,13	522,82	95,45
HCO_3^-	30	22,45	688,00	234,60	170,95	31,21
Cl^-	30	7,10	568,00	164,72	122,82	22,42
Fe^{2+}	30	0,04	1,15	0,34	0,25	0,05
Mn^{2+}	30	0,02	0,40	0,12	0,09	0,02
NO_3^-	30	0,05	196,20	62,24	65,08	11,88
NO_2^-	30	0,01	2,80	0,64	0,81	0,15

NH₄⁺	30	0,03	32,20	5,97	7,94	1,45
SO₄²⁻	30	1,50	195,00	51,27	48,02	8,77
PO₄³⁻	30	0,05	6,30	0,86	1,46	0,27
Na⁺	30	1,90	243,80	63,51	59,61	10,88
K⁺	30	0,60	87,75	25,58	21,56	3,94
Ca²⁺	30	1,35	175,50	45,09	41,65	7,61
Mg²⁺	30	0,07	9,75	2,76	2,49	0,45
THT	30	1,42	185,25	47,85	44,08	8,05
Cu²⁺	30	0,01	0,14	0,04	0,03	0,01
Pb²⁺	30	0,02	2,80	0,82	0,61	0,11
Zn²⁺	30	0,01	0,14	0,04	0,03	0,01
MT	30	96,00	1555,70	658,86	378,70	69,14

Min. = Minimum ; Max. = Maximum

Tableau 2 : Contribution des variables dans la détermination des facteurs.

Variables	Facteurs		
	1	2	3
pH	-0,35	0,42	-0,25
HCO ₃ ⁻	-0,73	-0,22	-0,29
Cl ⁻	-0,89	-0,43	0,12
Fe ²⁺	-0,88	-0,44	0,14
Mn ²⁺	-0,87	-0,47	0,13
NO ₃ ⁻	-0,18	0,08	-0,76
NO ₂ ⁻	-0,32	-0,15	-0,83
NH ₄ ⁺	-0,32	0,00	-0,72
SO ₄ ²⁻	-0,64	0,62	0,19
PO ₄ ³⁻	-0,09	0,49	-0,32
Na ⁺	-0,70	0,69	0,14
K ⁺	-0,63	0,72	0,16
Ca ²⁺	-0,74	0,64	0,12
Mg ²⁺	-0,67	0,72	0,10
Cu ²⁺	-0,89	-0,42	0,14
Pb ²⁺	-0,89	-0,43	0,11
Zn ²⁺	-0,83	-0,51	0,11
MT	-0,97	0,08	-0,17

Tableau 3 : Valeurs propres et pourcentages exprimés par les axes principaux.

Facteurs	Valeur propre	% total valeur propre	Cumul de valeur propre	% de variance exprimée cumulée
1	8,71	48,41	8,71	48,41
2	4,01	22,26	12,72	70,67
3	2,25	12,53	14,98	83,20

Tableau 4 : Matrice de corrélations entre les variables.

	pH	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	Fe ²⁺	Mn ²⁺	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cu ²⁺	Pb ²⁺	Zn ²⁺	MT	
pH	1,00																		
HCO ₃ ⁻	0,31	1,00																	
Cl ⁻	0,12	0,68	1,00																
Fe ²⁺	0,10	0,68	0,99	1,00															
Mn ²⁺	0,06	0,66	0,99	0,99	1,00														
NO ₃ ⁻	0,28	0,08	0,07	0,05	0,05	1,00													
NO ₂ ⁻	0,13	0,40	0,23	0,22	0,25	0,69	1,00												
NH ₄ ⁺	0,15	0,50	0,17	0,15	0,17	0,39	0,65	1,00											
SO ₄ ²⁻	0,38	0,13	0,33	0,30	0,29	0,17	0,02	0,04	1,00										
PO ₄ ³⁻	0,29	0,22	-0,14	-0,12	-0,17	0,21	0,12	0,05	0,10	1,00									
Na ⁺	0,44	0,28	0,34	0,32	0,30	0,08	0,03	0,15	0,90	0,32	1,00								
K ⁺	0,38	0,26	0,25	0,24	0,23	0,03	-0,02	0,16	0,87	0,29	0,96	1,00							
Ca ²⁺	0,42	0,34	0,39	0,38	0,36	0,07	0,08	0,18	0,89	0,33	0,99	0,94	1,00						
Mg ²⁺	0,46	0,30	0,30	0,29	0,26	0,10	0,03	0,17	0,88	0,36	0,99	0,96	0,97	1,00					
Cu ²⁺	0,11	0,71	0,99	0,99	0,99	0,03	0,22	0,18	0,32	-0,14	0,35	0,29	0,40	0,32	1,00				
Pb ²⁺	0,10	0,68	0,99	0,99	0,99	0,07	0,25	0,18	0,32	-0,14	0,34	0,26	0,39	0,30	0,99	1,00			
Zn ²⁺	0,05	0,61	0,97	0,97	0,98	0,11	0,26	0,14	0,27	-0,22	0,25	0,18	0,30	0,20	0,97	0,98	1,00		
MT	0,42	0,81	0,80	0,79	0,78	0,28	0,41	0,43	0,62	0,21	0,69	0,63	0,74	0,69	0,81	0,80	0,74	1,00	

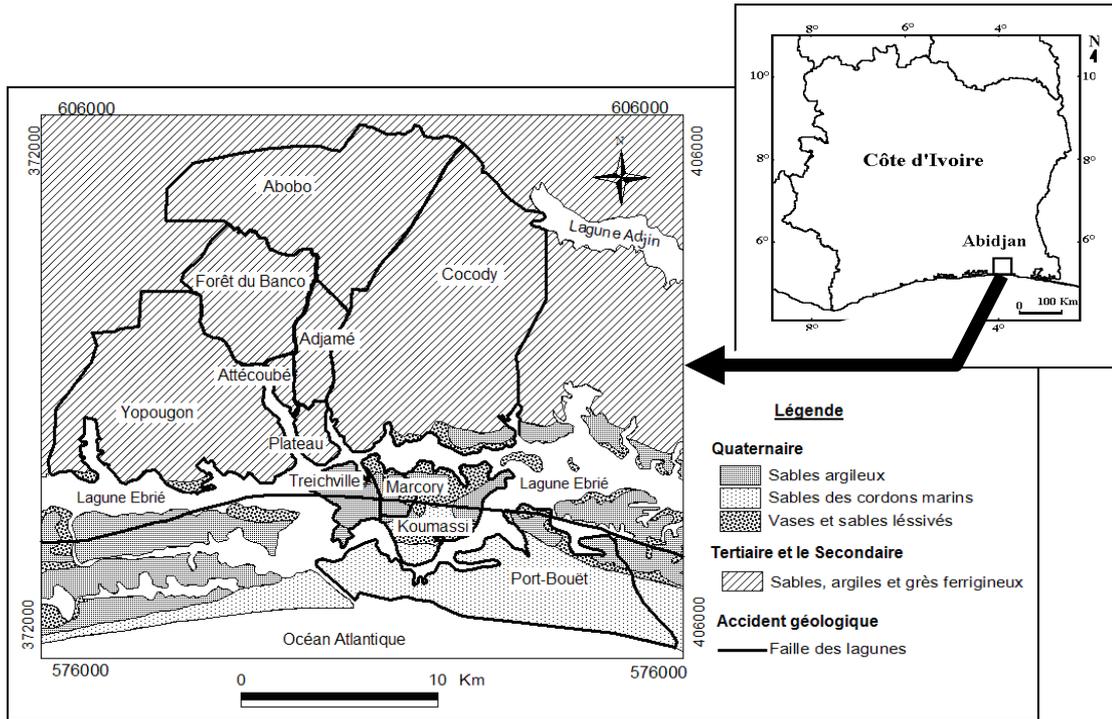


Figure 1 : Carte géologique de la ville d'Abidjan.

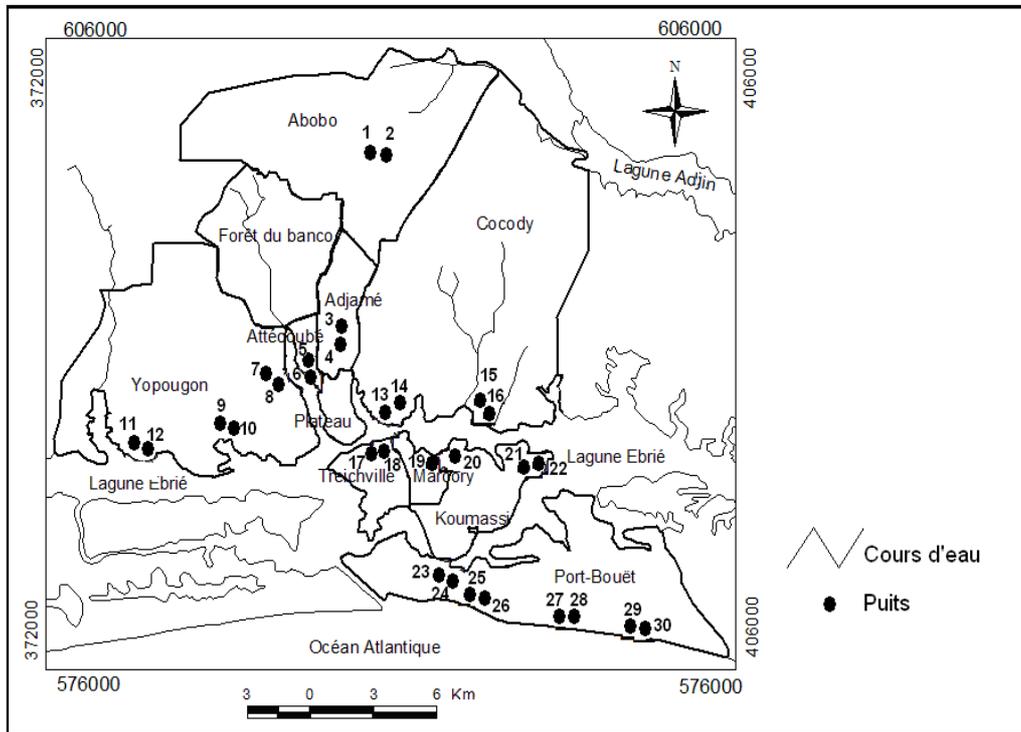


Figure 2 : Carte des sites d'échantillonnages des eaux souterraines.

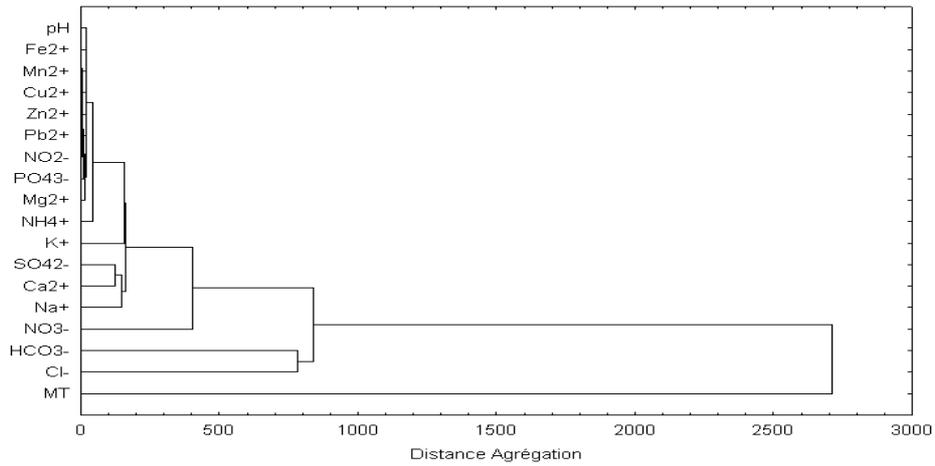
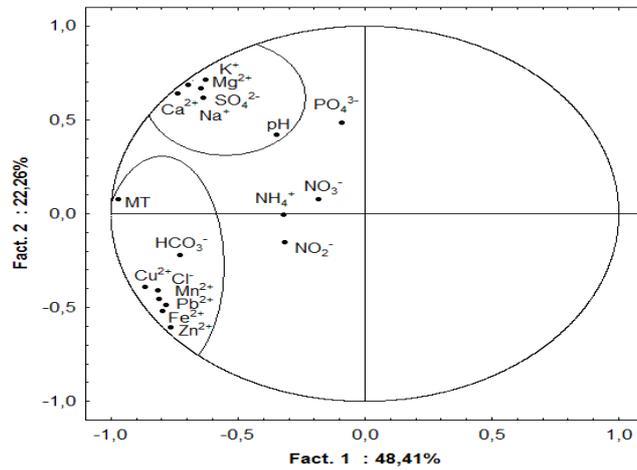
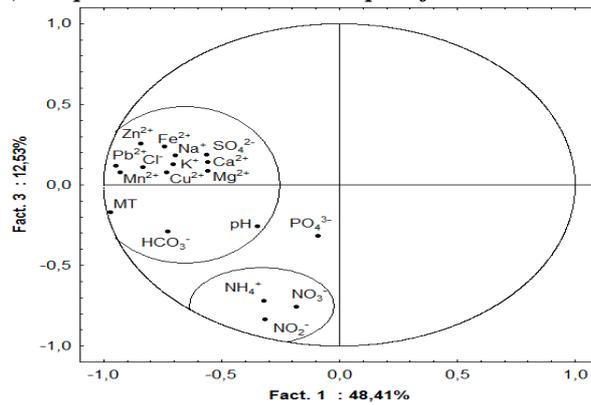


Figure 3 : Dendrogramme des eaux de puits de la ville d'Abidjan.



a) Espace des variables dans le plan factoriel F1 – F2



b) Espace des variables dans le plan factoriel F1 – F3

Figure 4 : Analyse en Composantes Principales des eaux de puits de la ville d'Abidjan.

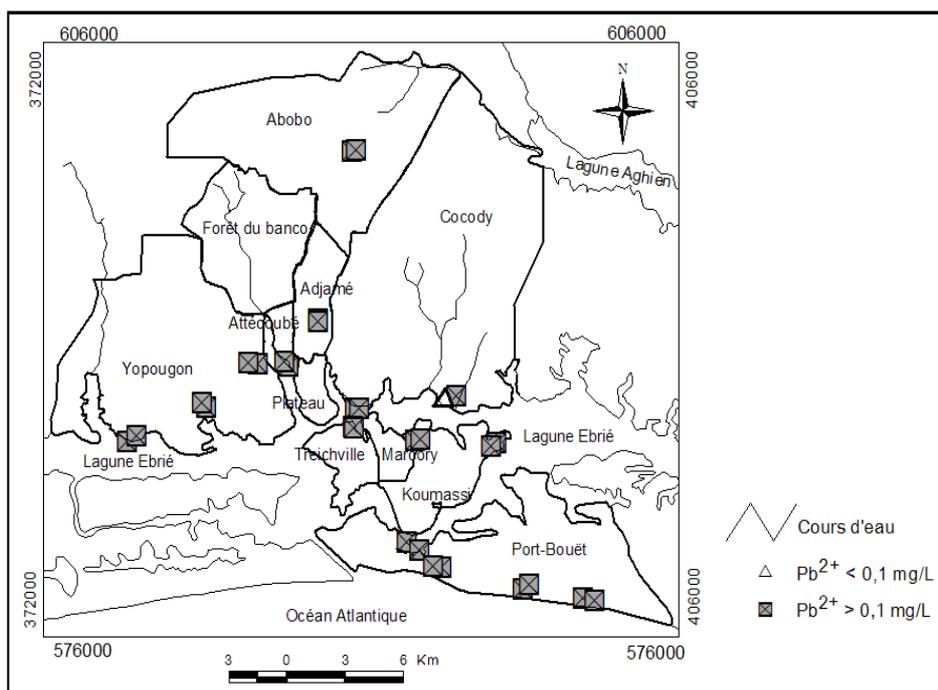


Figure 5 : Carte de répartition des teneurs en Pb^{2+} en $mg.L^{-1}$ des eaux des nappes phréatiques de la ville d'Abidjan.

DISCUSSION

Les eaux souterraines sont agressives, avec un pH moyen de $6 \pm 0,21$. Cette acidité de ces eaux a été observée dans le Sud de la Côte d'Ivoire notamment dans la région d'Abidjan par Ahoussi et al. (2008) ; dans la région d'Odiéné par Savané et Soro (2001). L'acidité des eaux souterraines en zone tropicale humide est principalement liée à la production de CO_2 dans les premières couches du sol (Tapsoba, 1995). L'analyse statistique multivariée a montré que la minéralisation des eaux des nappes phréatiques de la ville d'Abidjan est influencée par la pollution industrielle et artisanale. A cela s'ajoute une pollution d'origine organique liée aux rejets domestiques. Les teneurs de nitrates mesurées dans les eaux de puits sont très élevées, avec une moyenne de $62,2 \pm 11,88 mg.L^{-1}$, ce qui est largement supérieure à la norme OMS (2000) pour une eau de consommation humaine. Les composés azotés proviennent essentiellement de la dégradation de la matière organique par les microorganismes

dans les couches superficielles du sol (Tapsoba, 1995). Dans le sol, la matière organique est minéralisée à partir de l'oxydation biologique de l'ammonium (NH_4^+) en NO_3^- (Reddy et Patrick, 1981 *in* Canter, 1997). Les transformations produites à la surface du sol sont entraînées par lessivage du sol, avec l'infiltration des eaux de pluie en profondeur. Les fortes teneurs en nitrates sont associées à de fortes teneurs de plomb dans la ville d'Abidjan. Les teneurs en Pb^{2+} mesurées dans les eaux souterraines varient entre 0 et $2,8 mg.L^{-1}$ pour une moyenne de $0,8 \pm 0,11 mg.L^{-1}$ et restent supérieure à la norme OMS (2000) qui est de $0,1 mg.L^{-1}$. L'excès de plomb dans les eaux de puits atteste bien d'une pollution métallique des eaux souterraines. En effet, 97% des points d'eau étudiés présentent des teneurs en plomb au-dessus de la norme OMS. La carte de la répartition spatiale des teneurs en plomb des eaux des nappes phréatiques de la ville d'Abidjan (Figure 5) indique une abondance de plomb dans les eaux de puits des quartiers

situés au Sud de la ville d'Abidjan tels que Koumassi, Marcory et Port-Bouët par rapport à ceux du Nord de la ville. En effet, ces différents secteurs sont des anciens quartiers très urbanisés qui abritent des zones industrielles, des stations d'essence et diverses activités artisanales qui pourraient être à l'origine de cette pollution. Le Mn^{2+} , Cu^{2+} et Zn^{2+} présentent des teneurs inférieures à $0,05 \text{ mg.L}^{-1}$; $0,05 \text{ mg.L}^{-1}$ et 5 mg.L^{-1} , norme OMS.

La source du plomb et des autres métaux lourds ne s'éloigne pas de celles des rejets industriels, artisanaux et urbains. A cela s'ajoute l'apport des eaux de ruissellement issues des orages urbains et le lessivage des métaux en provenance des ordures ménagères et des résidus solubles. 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 autre produit ou déchet parsemant routes et parking ou en suspension dans l'air (Guillemin et Roux, 1992). Ces eaux de pluies s'infiltrent dans le sol pour atteindre plus tard les nappes superficielles. La faible profondeur des nappes et la défaillance du réseau d'assainissement de la ville d'Abidjan constituent les facteurs qui favorisent l'infiltration de ces polluants vers ces nappes phréatiques.

Au niveau de la ville d'Abidjan, le développement des activités anthropiques entraîne d'importants rejets d'effluents domestiques et industriels, ce qui constitue la principale source de production des métaux lourds dans l'environnement et dans les eaux de la ville (eau de surface et eau souterraine). Par ailleurs, Soro et al. (2009) ont également mis en évidence de fortes teneurs en métaux lourds dans les sédimentaires de la lagune Ebrié à Abidjan. Cela confirme la présence de fortes teneurs en métaux lourds dans les eaux des puits situés en bordure de cette lagune. La pollution métallique des eaux constitue un véritable problème environnemental en Afrique. Au Nigéria, d'importantes teneurs en

métaux lourds ont été observées par Ololade et Ajayi (2009) dans les eaux de la principale rivière de l'état d'Ondo. Au Maroc, ces fortes teneurs ont été également observées par Blidi et al. (2007) dans les eaux d'irrigation d'une rizière du Gharb. Les travaux de Ben Bouih et al. (2005) ont également mis en évidence de fortes teneurs en métaux lourds dans les sédiments du lac Fouarat au Maroc. Pour toutes ces eaux, la pollution métallique observée dans le milieu trouve son origine au niveau des activités anthropiques à savoir, les rejets d'ordures ménagères, le lessivage agricole et les rejets liés aux activités industrielles. Pour Hakom et al. (2001), cités par Ben Bouih et al. (2005) à ces sources s'ajoute la pollution métallique issue des garages de la mécanique, des ateliers de traitement de surface des véhicules par la peinture, des stations de distributions de produits pétroliers, et des industries de textile. Selon El Asslouj et al. (2007) les activités anthropiques sont à l'origine de la pollution des eaux souterraines de la communauté Mzamza au Maroc. Dans la plaine d'El Ma El Abiod en Algérie, Rouabhia et al. (2004) ont montré que les eaux souterraines sont également menacées par de nombreux foyers de pollution d'origine anthropiques tels que l'urbanisation, l'industrie, l'élevage et les décharges sauvages.

Conclusion

Les études réalisées sur les eaux des nappes phréatiques de la ville d'Abidjan ont permis de mettre en évidence les principales caractéristiques de ces eaux. Ces dernières, sont généralement acides, avec un pH moyen de $6 \pm 0,21$. La conductivité des eaux souterraines varie entre $155 \mu\text{S/cm}$ et $2350 \mu\text{S/cm}$, avec une moyenne de $939,13 \pm 95,45 \mu\text{S/cm}$. Les eaux souterraines présentent des teneurs en métaux lourds qui varient entre 0 et $2,8 \text{ mg.L}^{-1}$ pour le Pb^{2+} . Dans la ville d'Abidjan, la majeure partie des eaux étudiées a des teneurs en plomb supérieures à la norme OMS ($0,1 \text{ mg.L}^{-1}$). Les teneurs en Mn^{2+} , Cu^{2+} et Zn^{2+} restent faibles et sont largement inférieures à la norme OMS qui est

respectivement de 0,05 mg.L⁻¹; 0,05 mg.L⁻¹ et 5 mg.L⁻¹. Les métaux lourds présents dans les eaux souterraines sont d'origines anthropiques, issus principalement des rejets industriels, artisanaux, urbains et domestiques. Les eaux de puits de la ville d'Abidjan contiennent d'importantes quantités de plomb et sont polluées. Elles sont impropres à la consommation des populations et leur utilisation expose les populations à des risques sanitaires.

REFERENCES

- Aghui N, Biémi J. 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.
- Ahoussi KE, Soro N, Soro G, Lasm T, Oga MS, Zadé S. 2008. Groundwater pollution in African biggest towns: Case of the town of Abidjan (Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, **20**(2): 302-316.
- Ahoussi KE, Soro N, Soro G, Oga MS, 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 KE, Soro N, Koffi YB, 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.
- 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 de Doctorat d'Etat es Sciences Naturelle, Université Nationale de Côte d'Ivoire, p. 480.
- Ben Bouih H, Nassali H, Leblans M, Srhiri A. 2005. Contamination en métaux traces des sédiments du lac Fouarat. *Afrique Science*, **1**(1): 109-125.
- Bliidi SE, 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.
- Canter LW. 1997. *Nitrates in Groundwater*. Edition Lewis Publishers.
- Coulibaly A, Mondé S, Wognin VA, 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.
- 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 JC. 1992. La pollution des eaux souterraines. Manuels et Méthodes n° 23. Edition, BRGM.
- Güler C, Thyne GD, Mccray JE, Tuner AK. 2002. Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal*, **10**: 455-474.
- Jain P, Sharma JD, Sohu D, Sharma P. 2005. Chemical analysis of drinking water of villages of Sanganer Tehsil, Jaipur District. *Int. J. Environ. Sci. Tech.*, **2**(4): 373-379.
- Kouamé KJ. 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 de Doctorat, Université de Cocody, Abidjan, p. 227.
- Kouassi AM, Kaba N, Métongo BS. 1995. Land-based sources of pollution and environmental quality of the Ebrié

- lagoon waters. *Mar. Pollut. Bull.*, **30**(5): 295-300.
- Lagarde J. 1995. *Initiation à l'Analyse des Données*. Ed. Dunod : Paris.
- Martin L, Moutou JM, Kongo-Mantono MS. 2009. Evaluation hydro-chimique des eaux souterraines au Sud-Ouest de Brazzaville, Congo. *Afrique Science*, **5**(1): 82-98.
- Ololade IA, Ajayi AO. 2009. Contamination profile of major rivers along the highways in Ondo State, Nigeria. *Journal of Toxicology and Environmental Health Sciences*, **1**(3): 38-53.
- OMS. 2000. *Critères d'Hygiène et Documentation à l'Appui. Directives de qualité pour l'eau de boisson* (2nd edn, vol. 2). OMS: Genève, Suisse.
- Prasad BG, Narayana TS. 2004. Subsurface water quality of different sampling stations with some selected parameters at Machilipatnam Town. *Nat. Env. Poll. Tech.*, **3**(1): 47-50.
- 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*, **4**(15): 347 - 352.
- Savané I, Soro N. 2001. Caractérisation chimique et isotopique des eaux souterraines du Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire: recharge des aquifères discontinus de la région d'Odienné. *Africa Géoscience Review*, **8**(4): 379-390.
- Soro G, Metongo SB, Soro N, Ahoussi KE, Kouamé KF, Zadé SGP. Soro T. 2009. Métaux lourds (Cu, Cr, Mn et Zn) dans les sédiments de surface d'une lagune tropicale africaine : cas de la lagune Ebrie (Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **3**(6): 1408-1427.
- Tapsoba SA. 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 Doctorat 3^{ème} cycle, Université Nationale de Côte d'Ivoire, p. 200.
- Travi Y, Mudry J. 1997. Méthode pour l'évaluation et la gestion du risque nitrate dans les aquifères du socle de la zone sahéenne d'Afrique de l'Ouest. *Revue d'Hydrogéologie*, **1**: 13-21.
- Yidana SM, 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.