



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)

Kouassi Ernest AHOUSSE^{1*}, Yéï Marie Solange OGA¹, Yao Blaise KOFFI¹,
Amani Michel KOUASSI², Nagnin SORO¹ et Jean BIEMI¹

¹Laboratoire 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).

²Département 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

Le site de Kossihouen qui est la zone d'étude est le secteur de la construction du futur Centre d'Enfouissement Technique (CET) du District d'Abidjan. Durant cette étude, les ressources en eau de la zone ont été caractérisées afin de mettre en évidence leur relation avec les environnements humain et naturel. Pour sa réalisation, une série d'analyses a été réalisée sur les ressources en eaux de la zone. Il s'agit des analyses physico-chimiques et microbiologiques effectuées sur des échantillons prélevés dans les rivières, les marigots, les puits et les forages sur le site et dans ses environs. Les résultats de ces analyses ont été traités à partir d'une méthode hydrochimique qui utilise le diagramme triangulaire de Piper et des méthodes statistiques multivariées dont l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA). Les résultats de cette étude montrent que la température des eaux de la région varie entre 25,60 et 28,20 °C, avec une moyenne de $26,57 \pm 0,32$ °C. Les eaux sont agressives, avec un pH qui varie entre 5,21 et 6,98 unités pH, pour une moyenne de $6,19 \pm 0,24$. Elles sont faiblement minéralisées, avec une conductivité électrique qui varie entre 38,40 et 247 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, pour une valeur moyenne de $104,81 \pm 27,57$ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Celles-ci sont douces, avec une dureté moyenne de 4,17 °F. Les eaux du site sont riches en fer et ont des teneurs qui varient entre 0,40 et 3,60 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, pour une moyenne de 1,59 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. Les eaux de la zone d'étude se répartissent en trois grandes familles. Il s'agit des eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes qui sont les plus importantes (57,14%), les eaux chlorurées calciques et magnésiennes (28,57%) et les eaux chlorurées sodi-potassiques (14,29%). L'Analyse en Composantes Principales et la Classification Ascendante Hiérarchique indiquent que la minéralisation des eaux du site du CET de Kossihouen est contrôlée par trois grands phénomènes : la minéralisation temps de séjour qui se traduit par l'hydrolyse des minéraux silicatés pour les eaux souterraines (forages et puits), le pluviollessivage des sols pour les eaux superficielles (eaux de surface) et l'influence des activités humaines dans la production des déchets polluants. Cette étude montre également que les ressources en eau du site de Kossihouen sont fortement influencées par les activités anthropiques, avec la présence des coliformes fécaux de type *Escherichia coli* et de streptocoques fécaux qui sont la conséquence d'une pollution d'origine humaine récente.

© 2011 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés : Analyse en composantes principales, Classification hiérarchique Ascendante, Diagramme de Piper, Hydrochimie et Environnement.

© 2011 International Formulae Group. All rights reserved.
DOI : <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v5i5.32>

INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, l'environnement sanitaire du District d'Abidjan et des communes annexes s'est fortement dégradé suite à une forte pression démographique et à une mauvaise gestion des déchets solides et liquides (Sané, 1999 ; BNETD, 2000 ; Sané, 2002 ; Dongo et al., 2008). Par ailleurs, la décharge d'Akouédo, mis en service depuis plusieurs décennies est aujourd'hui dépassée et ne répond plus aux besoins de la population abidjanaise. Pour la résolution de ce problème, l'Etat de Côte d'Ivoire a décidé la réalisation d'un Centre d'Enfouissement Technique (CET) pour le District d'Abidjan et ses environs. Ainsi en 2007, le ministère en charge du projet a décidé que le site du CET soit situé en dehors du bassin sédimentaire pour éviter les problèmes de pollution des eaux souterraines mise en évidence par des travaux antérieurs (Oga, 1998 ; Kouamé, 2007 ; Ahoussi et al., 2008), quelles que soient les performances et la pertinence de la technologie utilisée. Cette disposition permet de garantir la protection de la nappe phréatique et les réserves qui alimentent la ville d'Abidjan en eau potable. Cependant, compte tenu des écoulements souterrains et la possibilité de transferts de fluide entre les milieux discontinus (socle cristallin et cristallophyllien) et continu (bassin sédimentaire), il est possible qu'un CET situé même en dehors du bassin sédimentaire côtier constitue une source de pollution des eaux de la nappe d'Abidjan. L'objectif de cette étude est donc de caractériser le contexte hydrogéologique, hydrochimique et microbiologique dans lequel le Centre d'Enfouissement Technique (CET) de Kossihouen est mis en place afin de résoudre définitivement le problème de la contamination des eaux utilisées pour l'alimentation des populations par les eaux usées en provenance de cette décharge. Pour atteindre l'objectif de cette étude, des travaux de terrain et de laboratoire ont été réalisés tant en hydrogéologie, hydrochimie qu'en microbiologie. Plusieurs études ont déjà été réalisées sur la quantité et/ou sur la qualité des

eaux de la nappe d'Abidjan. Ces études concernent très souvent les problèmes de la réalimentation et de l'impact des activités socio-économiques situées sur le bassin sédimentaire sur la qualité des eaux de la nappe. Cependant, les études les plus récentes sont celles de Soro et al. (2006) sur la variabilité du régime pluviométrique du Sud de la Côte d'Ivoire et son impact sur l'alimentation de la nappe d'Abidjan ; Oga et al. (2008) sur le mécanisme de recharge des nappes et la pollution nitratée dans les aquifères sédimentaires côtiers ; Ahoussi et al. (2008 et 2009) sur la qualité physico-chimique et microbiologique des eaux souterraines de la ville d'Abidjan. Soro et al. (2010) sur les menaces exercées par l'urbanisation anarchique, la pression démographique et la gestion des déchets solides dans le District d'Abidjan sur la qualité des nappes phréatiques du Sud de la Côte d'Ivoire. Aussi, cette zone est-elle marquée par une absence d'étude portant sur l'influence des activités se déroulant sur le socle et qui pourraient dégrader la qualité des eaux de la nappe d'Abidjan utilisées pour l'alimentation en eau de boisson des populations.

Cadre géographique et géologique du site du CET de Kossihouen

Kossihouen est un village de la Sous-Préfecture de Songon, dans le District d'Abidjan. Il est situé sur l'autoroute du Nord au PK 41 et est habité par les populations autochtones Tchaman ou Ebré. Dans cette cité cosmopolite, sont également présents des populations halogènes ivoiriennes (Dan, Gouro, Dioula, etc.) et des pays limitrophes (Burkina Faso, Mali, Guinée, etc.). Le CET est situé à l'intersection de l'autoroute et de la voie en terre reliant Kossihouen à la Sous-Préfecture de Songon (Figure 1). Le site du Centre d'Enfouissement Technique est distant du village de Kossihouen de 4 Km et de la rivière la plus proche de plus de 10 Km. Il s'étend sur une superficie de plus de 100 hectares composée de 3 collines d'une hauteur allant de 4 à 10 m. Cette zone est drainée par

4 ruisseaux dont 3 saisonniers s'écoulent d'Est en Ouest et se jettent dans le quatrième qui est lui permanent et s'écoule dans la direction Nord-Sud.

Du point de vue géologique, le site d'implantation du Centre d'Enfouissement Technique (CET) de Kossihouen est situé en zone de socle cristallin et cristallophyllien. La géologie du CET se confond avec celle de la région de Dabou, située au Sud de la Côte d'Ivoire. Cette région est marquée par la présence de deux unités géologiques distinctes : le socle éburnéen au Nord et le bassin sédimentaire côtier au Sud (Figure 2). Le socle éburnéen est formé de roches cristallines et cristallophylliennes qui occupent le Centre et le Nord de la région. Il s'agit principalement de schistes birimiens qui, très altérés dans les niveaux supérieurs, donnent des argiles caractéristiques : versicolores, tigrées ou bariolées.

Dans cette région, tous les bancs schisteux sont en général redressés à la verticale, si bien que les plans de schistosité sont quasiment tournés vers le haut, vers les précipitations, ce qui permet à ces formations de contenir beaucoup d'eau. Les schistes ont connu plusieurs phases de remontées hydrothermales issues de magma liquide comme en témoigne la présence de nombreux filons de quartz à travers les plans de schistosité. Le socle éburnéen de Dabou, de nature cristalline et cristallophyllienne, est fréquemment intrudé ici et là par des pointements de granitoïdes éburnéens (granites à un ou deux micas, granodiorites, microdiorites de teinte claire à sombre à grains fins, moyens ou grossiers) et par d'autres roches de nature plus basique. Du point de vue minéralogique, les granites de la région de Dabou sont des granites à deux micas associés essentiellement aux minéraux suivants: quartz, plagioclases, orthose, microcline, biotite et muscovite (Tapsoba, 1995). La séricite et la chlorite y sont associées respectivement aux plagioclases et à la biotite.

Sur le site du CET de Kossihouen, la présence de deux horizons d'altération est

constatée. Un horizon d'altérites ferralitiques de couleur rouge vif, riches en nodules de fer et dont le caractère latéritique est très marqué, notamment dans la partie sommitale des plateaux. L'épaisseur de ce niveau est généralement assez importante et peut atteindre 10 à 30 m selon les endroits. L'ensemble est souvent coiffé de cuirasses ferrugineuses indurées à l'air libre et quelques fois fissurées. D'un horizon d'altérites remaniées sur les bas versants qui reposent, en général, sur un horizon sableux. Ce sont des argiles tachetées, polycolorées, tigrées ou bariolées bien connues dans le bassin sédimentaire de Côte d'Ivoire. En général, dans les formations altéritiques, la proportion d'argiles et de sables fins est nettement plus élevée dans les horizons altéritiques se développant au-dessus des schistes que dans ceux liés aux granites. En conséquence, le substratum géologique semble participé efficacement au façonnement différentiel de la morphologie du relief généralement fonction de la nature géologique du socle schisteux ou granitique. Les excavations ouvertes sur le site présentent les caractéristiques géologiques très remarquables des roches mises à nu. Le fond de l'excavation est occupé par des schistes birimiens en feuillets redressés à la verticale et traversés par des filons de quartz de position et d'orientation diverses. Les filons de quartz verticaux sont parallèles aux plans de schistosité dans ces schistes birimiens redressés. Dans cette position, ces filons de quartz pourraient contribuer de façon non négligeable à l'infiltration des eaux pluviales. Il existe également des filons et filonnets de quartz et de feldspath en position horizontale et parfois même enchevêtrée ou entrecroisée de façon complexe.

Les schistes birimiens du CET de Kossihouen sont en général des altérites polycolorées dont les niveaux supérieurs s'altèrent intensément en donnant : des argiles lie-de-vin, jaunes ou rouges ; des argiles vertes à nombreuses paillettes de micas encore bien conservées; et un front d'altération active moins argileux et marqué par la présence de la structure schisteuse.

Sur le plan hydrogéologique, la région compte trois principaux aquifères dans lesquels se développent les nappes d'eaux souterraines : aquifères altéritiques, aquifères de fissures et aquifères du bassin sédimentaire. Les aquifères d'altérites se développent au-dessus des terrains de socle cristallin et cristallophyllien où leurs épaisseurs varient entre 2,5 et 33 m sur les granitoïdes et de 15 à 40 m sur les schistes. Les arènes granitiques sont les niveaux les plus perméables, avec $K = 10^{-3}$ m/s. Ces produits issus de l'altération du substratum peuvent recéler des nappes d'eau importantes. Ces nappes d'altérites sont les plus exploitées par les puits villageois dont la profondeur atteint rarement 15 mètres. Elles reçoivent directement les précipitations et sont caractérisées par un rabattement excessif du niveau piézométrique en saison sèche et une recharge immédiate en période de pluie. La réserve d'eau dans les aquifères d'altérites est fonction de plusieurs paramètres tels que la perméabilité, l'épaisseur des altérites et la nature du remplissage des fractures, mais aussi du taux de l'évapotranspiration de la région (Biémi, 1992). Compte tenu de leur niveau piézométrique proche de la surface du sol, les nappes d'altérites sont souvent menacées par les activités anthropiques, d'où leur trop grande vulnérabilité à la pollution. Elles constituent cependant, une importante réserve hydraulique exploitable par l'intermédiaire de réseaux de fissures drainantes communiquant avec elles (Jourda, 1987). Les aquifères de fissures sont les plus productifs à cause de l'intense fracturation qui affecte le socle cristallin. Les nappes de fissures sont captées par une multitude de forages réalisés sur des fractures ouvertes dans le socle. Ces nappes de fissures peuvent fournir des débits assez importants quand elles sont captées par les forages bien positionnés dans les fractures. Dans la région de Dabou, les forages réalisés en milieu de socle débitent moins de $6 \text{ m}^3/\text{h}$ (Tapsoba, 1995). Les valeurs de transmissivité s'accroissent du Nord vers le Sud de la manière suivante : $4,9 \cdot 10^{-6}$ à $8,9 \cdot 10^{-5}$ m^2/s dans les schistes ; et $2,3 \cdot 10^{-5}$ à $4,6 \cdot 10^{-4}$

m^2/s dans les granitoïdes. La dispersion des valeurs de transmissivité souligne la complexité de la géologie et les conditions de gisement des nappes. L'alimentation se fait de façon plus nette par drainage latéral à la faveur des fractures créées par certaines structures qui émergent en surface. Ce drainage permet d'établir une liaison entre socle cristallin et bassin sédimentaire. La tectonique du socle éburnéen cristallin et cristallophyllien de Dabou, selon Tapsoba (1995) présente plusieurs familles de fractures orientées : $N30-40^\circ$; $N60-70^\circ$; $N110-120^\circ$; $N120-130^\circ$, dont le rôle dans la mise en place des réservoirs et dans la circulation des eaux souterraines vers le Sud n'est pas encore clairement défini.

MATERIEL ET METHODES

Une campagne d'échantillonnage a été organisée en janvier 2009 sur le site du Centre d'Enfouissement Technique (CET) de Kossihouen, dans les villages et les campements environnants pour la réalisation de cette étude (Figure 3). Les échantillonnages d'eau ont été réalisés pendant la grande saison sèche et ont portés sur les eaux de puits, les eaux de forages, et les eaux de rivières et de marigots. Lors de cette campagne, les échantillons d'eau prélevés ont été mis dans des bouteilles en polyéthylène de capacité 1 litre, préalablement lavées à l'acide nitrique puis à l'eau distillée. Sur le terrain, avant le remplissage des bouteilles, celles-ci ont été lavées trois fois avec l'eau à prélever. Le remplissage des bouteilles a été fait à ras bord puis le bouchon vissé afin d'éviter tout échange gazeux avec l'atmosphère. Les échantillons d'eau ont été ensuite transportés dans une glacière à 4°C au laboratoire pour analyse dans l'heure qui suit le prélèvement. Lors de l'échantillonnage, les paramètres physiques des eaux (eaux de surface et eaux souterraines) tels que la température, le pH, et la conductivité électrique (CE) ont été mesurés *in situ* dans les puits et forages pour les eaux souterraines et dans les rivières et les marigots pour les eaux de surface. 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), de la température, de la salinité et les solides totaux dissous (TDS). Les éléments dosés au laboratoire sont Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Fe^{3+} pour les cations et Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- pour les anions. Au total, 7 échantillons dont deux de forages, deux de puits, deux de marigot et un de rivière ont été prélevés pour des analyses chimiques. Quatre (4) échantillons ont également été prélevés dont deux de puits, un de forage et un de rivière pour des analyses bactériologiques (*Escherichia coli*, streptocoques fécaux et *Clostridium Perfringens*). Un GPS Garmin Map 60 CSX a été utilisé pour la prise des coordonnées géographiques en UTM des points d'échantillonnage et une sonde piézométrique OTT (100 m) pour la mesure de la profondeur des eaux souterraines dans les puits.

Les points d'eau échantillonnés sont généralement utilisés pour l'approvisionnement en eau des populations. Les données collectées ont été traitées en utilisant une combinaison de méthodes statistiques multivariées et de méthode hydrochimique. Une première approche fait appel à l'Analyse en Composantes Principales (ACP) sur des variables centrées réduites. L'analyse statistique (ACP) permet de mettre en évidence les ressemblances et la position graphique que présenteraient deux ou plusieurs variables chimiques au cours de leur évolution. Cette analyse a pour but de suivre l'évolution chimique des eaux souterraines. En effet, 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).

La seconde approche est basée sur l'utilisation de l'analyse par la Classification

Hiérarchique Ascendante (CHA) pour l'étude des phénomènes à l'origine de la minéralisation des eaux. La Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) est un outil puissant pour analyser des données de la chimie d'eau et pour la formulation de modèles géochimiques (Yidana, 2008). 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'ACP et le CHA comportent 7 descripteurs et 13 variables qui sont: la conductivité électrique (CE), 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^+ et Fe^{3+} . Dans cette étude, toutes les différentes analyses statistiques des données ont été réalisées à l'aide du logiciel STATISTICA version 6.0.

La méthode hydrochimique a nécessité l'utilisation du diagramme triangulaire de Piper pour la classification hydrochimique des eaux de la région. En effet, la classification des eaux est très fréquemment utilisée dans le domaine de l'hydrochimie avec de très bons résultats (Yermani et al., 2003 ; Kouzana et al., 2007 ; Oga et al., 2009 ; Ahoussi et al., 2010 ; Kouassi et al., 2010). Les résultats des analyses microbiologiques ont été 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. Toutes les différentes méthodes utilisées dans cette étude ont permis de connaître le mécanisme de minéralisation des eaux du site du CET de Kossihouen ainsi que des relations qui existent entre ces ressources en eau et les activités anthropiques de la zone d'étude.

RESULTATS

Résultats hydrogéologique et hydrochimique

La profondeur des eaux souterraines du site du CET de Kossihouen mesurée dans les puits varie de 4,27 m à 7,65 m, avec une

moyenne de 5,96 m, ce qui montre que les nappes phréatiques sont peu profondes. Les résultats statistiques des analyses physico-chimiques réalisées sur les ressources en eau du site du CET de Kossihouen sont présentés dans le Tableau I.

La température des eaux de la région varie entre 25,60 et 28,20 °C, avec une moyenne de $26,57 \pm 0,32$ °C. En ce qui concerne le pH des eaux, il varie entre 5,21 et 6,98 unités pH, pour une moyenne de $6,19 \pm 0,24$, ce qui indique que les eaux sont acides. Les eaux de la région sont faiblement minéralisées. La conductivité électrique varie entre 38,40 et 247 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, avec une valeur moyenne de $104,81 \pm 27,57$ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Les eaux à forte conductivité sont celles du marigot de Kodiakro-Balekro (247 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) et du forage du village Kossihouen (158,3 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). La dureté des eaux souterraines du site varie entre 0 °F et 7 °F, avec une moyenne de 4,17 °F. Cela révèle que les eaux sont douces dans l'ensemble. Les eaux sont riches en fer, avec des teneurs qui varient entre 0,40 et 3,60 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, pour une moyenne de 1,59 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. La plus forte valeur a été obtenue au niveau des eaux de puits de Bélakro (3,60 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). La classification des résultats d'analyses chimiques obtenus à partir du diagramme triangulaire de Piper permet d'identifier trois familles d'eau (Figure 4).

Les eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes sont les plus importantes et représentent 57,14% des eaux étudiées. Il s'agit des eaux du puits de Makourapleu, du forage de Kossihouen, de l'eau du marigot de Kodiakro-Balekro et de l'eau de la rivière Pébo. Les eaux chlorurées calciques et magnésiennes (28,57%), sont constituées par les eaux du forage de Kodiakro et celles du marigot situé à l'entrée du CET. Ensuite, viennent les eaux chlorurées sodi-potassiques (14,29%) qui ne s'observent qu'au niveau du puits de Bélakro. Dans la région, les eaux sont donc caractérisées par une prédominance des ions bicarbonates sur les ions chlorures et les

sulfates qui sont pratiquement absents dans ces eaux. Le calcium constitue le cation le plus important, puis viennent ensuite Na^+ et K^+ .

Analyse en composantes principales (ACP)

L'étude statistique à partir de l'ACP donne de nombreux résultats qui sont présentés dans les Tableaux II, III et IV. Dans le Tableau II sont consignés les valeurs propres, les variances exprimées pour chaque facteur et leurs cumuls. Le facteur F1, avec une variance exprimée de 41,92%, est le plus important de tous, ensuite viennent les facteurs F2 et F3, avec respectivement 21,29% et 17,27% de la variance exprimée. Ces trois facteurs traduisent l'essentiel des informations recherchées et permettent de représenter de manière significative le nuage de points car la somme de la variance exprimée par ces facteurs est supérieure à 70%.

La contribution des différentes variables dans la définition des principaux facteurs est donnée par le Tableau III. Chaque facteur est défini par un certain nombre de variables essentielles dans la mise en évidence du mécanisme de minéralisation des eaux.

Ce tableau montre que le facteur F1, le plus important est défini par HCO_3^- ($r=0,18$), Na^+ ($r=0,13$), Ca^{2+} ($r=0,15$), Mg^{2+} ($r=0,15$) et SO_4^{2-} ($r=0,10$). Les liens significatifs qui existent entre les différents paramètres sont donnés par la matrice de corrélation (Tableau IV). Ces liens sont traduits par les différentes corrélations qui existent entre les variables étudiées.

Il existe une importante corrélation entre HCO_3^- et Mg^{2+} ($r=0,95$), Ca^{2+} ($r=0,89$), Na^+ ($r=0,84$). Cette bonne corrélation s'observe également entre Na^+ et Mg^{2+} ($r=0,77$). Le coefficient de corrélation entre pH et HCO_3^- est de 0,73.

L'espace des variables du plan factoriel F1-F2 (Figure 5) montre que ce plan exprime 61,39% de la variance exprimée. Le facteur

F1 (41,81%) est déterminé par HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} , CE et pH. Les éléments qui définissent ce facteur proviennent d'une longue durée de mise en solution suite au contact eau-roche. Ces éléments proviennent de l'hydrolyse des minéraux silicatés présents dans les roches qui constituent le substratum rocheux des aquifères qui abritent les eaux de la région. En effet, l'hydrolyse étant un processus lent, le facteur F1 rend compte des conditions d'acquisition du chimisme de l'eau.

Le facteur 2 qui explique 19,58% de l'inertie du nuage des points représentatifs des ouvrages est déterminé par NH_4^+ , NO_2^- , K^+ et Fe^{3+} . Ce plan met en évidence les échanges superficiels qui se déroulent entre les eaux du site du CET et les eaux de ruissellement issues des précipitations et du drainage des sols. Ces échanges mettent en évidence le phénomène de pluvioléssivage des sols. Dans l'espace des unités statistiques du plan factoriel F1- F2, les eaux de la zone d'étude se regroupent en deux familles. La classe 1 regroupe les points d'eau 1, 6 et 7 correspondant aux eaux des marigots et du forage de Kossihouen fortement minéralisées, influencées par la minéralisation liée à l'hydrolyse des minéraux silicatés du substratum rocheux. La classe 2 contient les points d'eau 2, 3, 4 et 5 qui sont les eaux superficielles, faiblement minéralisées des puits et de la rivière Pébo. Ces points d'eau sont influencés par la minéralisation liée au pluvioléssivage des sols.

Dans l'espace des variables du plan factoriel F1-F3 (Figure 6), le facteur F1 est toujours défini par les éléments qui proviennent d'une longue durée de mise en solution suite au contact eau-roche (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} , CE et pH). Quant au facteur F3, il est déterminé par NO_3^- et Cl. Ces deux éléments rendent compte des apports superficiels dans la minéralisation des eaux de la zone. Les composés azotés proviennent de la dégradation de la matière organique par les microorganismes dans les couches

superficielles du sol, avec production de CO_2 pour être entraînés ensuite en profondeur par les eaux d'infiltration. Ces ions mettent en évidence l'intervention des activités anthropiques dans la minéralisation des eaux du site.

Dans l'espace des unités statistiques du plan factoriel F1-F3, les eaux de la zone d'étude se constituent en deux grands groupements. La classe 1 qui contient les points 1, 6 et 7 correspondant aux eaux des marigots et du forage de Kossihouen fortement minéralisées et influencées par la minéralisation liée à l'hydrolyse des minéraux silicatés du substratum rocheux. La classe 2 renferme toujours les points 2, 3, 4 et 5 qui sont les eaux superficielles, faiblement minéralisées des puits et de la rivière Pébo, qui subissent l'influence des activités anthropiques.

Classification Hiérarchique Ascendante (CHA)

Le dendrogramme (Figure 7) issu de la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) met en évidence deux principaux regroupements des variables. Le premier regroupement est constitué de CE, HCO_3^- , Ca^{2+} , Cl et Na^+ . Ce groupe rend compte de la minéralisation temps de séjour ou du phénomène de l'hydrolyse des minéraux silicatés contenus dans les roches sous-jacentes. Le second groupe est constitué de Mg^{2+} , Fe^{3+} , K^+ , NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , SO_4^{2-} et pH. La présence massive des composés azotés NH_4^+ , NO_2^- et NO_3^- dans ce groupe indique une forte contribution des activités anthropiques dans la minéralisation des eaux souterraines et des eaux de surface du site du Centre d'Enfouissement Technique (CET) de Kossihouen.

Analyses microbiologiques

Les résultats des analyses microbiologiques sont contenus dans le Tableau V. Les analyses montrent la présence

des bactéries de types coliformes fécaux (*Escherichia coli*) dans l'eau de l'échantillon N°5 correspondant à l'eau de la rivière Pébo, située à proximité du village Kodiakro.

Quant aux streptocoques fécaux et *Clostridium Perfringens*, les taux dans l'eau de la rivière Pébo sont respectivement de 1700 et 400 pour 100 ml d'eau. Les streptocoques fécaux sont également présents en quantité importante (300) dans l'eau de l'échantillon

N°2 correspondant à l'eau du puits du village Makourapleu. Cela montre que les eaux de la zone d'étude sont soumises à une influence anthropique. En effet, la valeur indicative pour la qualité bactériologique proposée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) est de zéro coliforme pour 100 ml d'eau or des teneurs supérieures à cette valeur ont été observées dans les eaux du site du CET de Kossihouen.

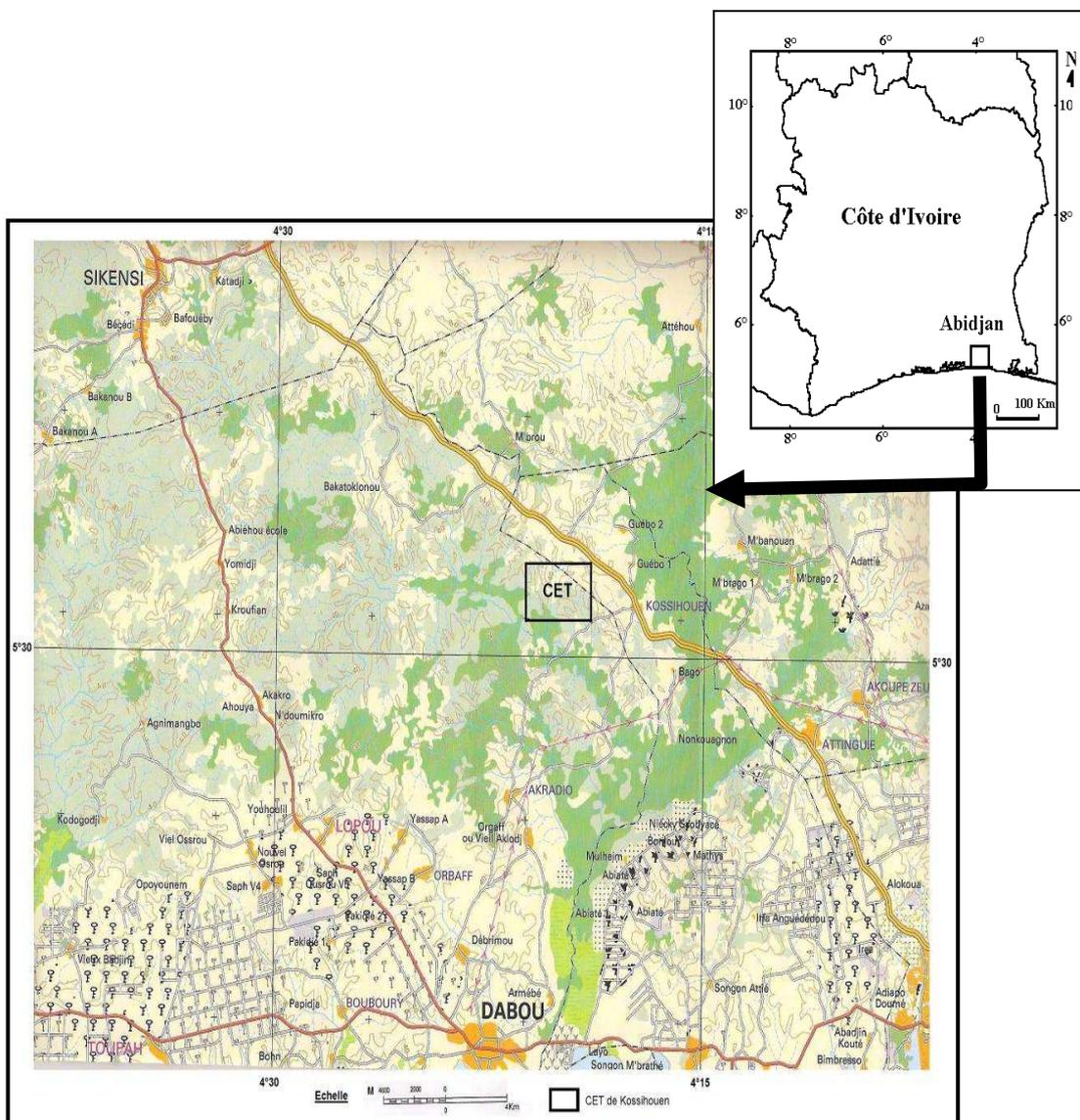


Figure 1. Localisation du CET de Kossihouen.

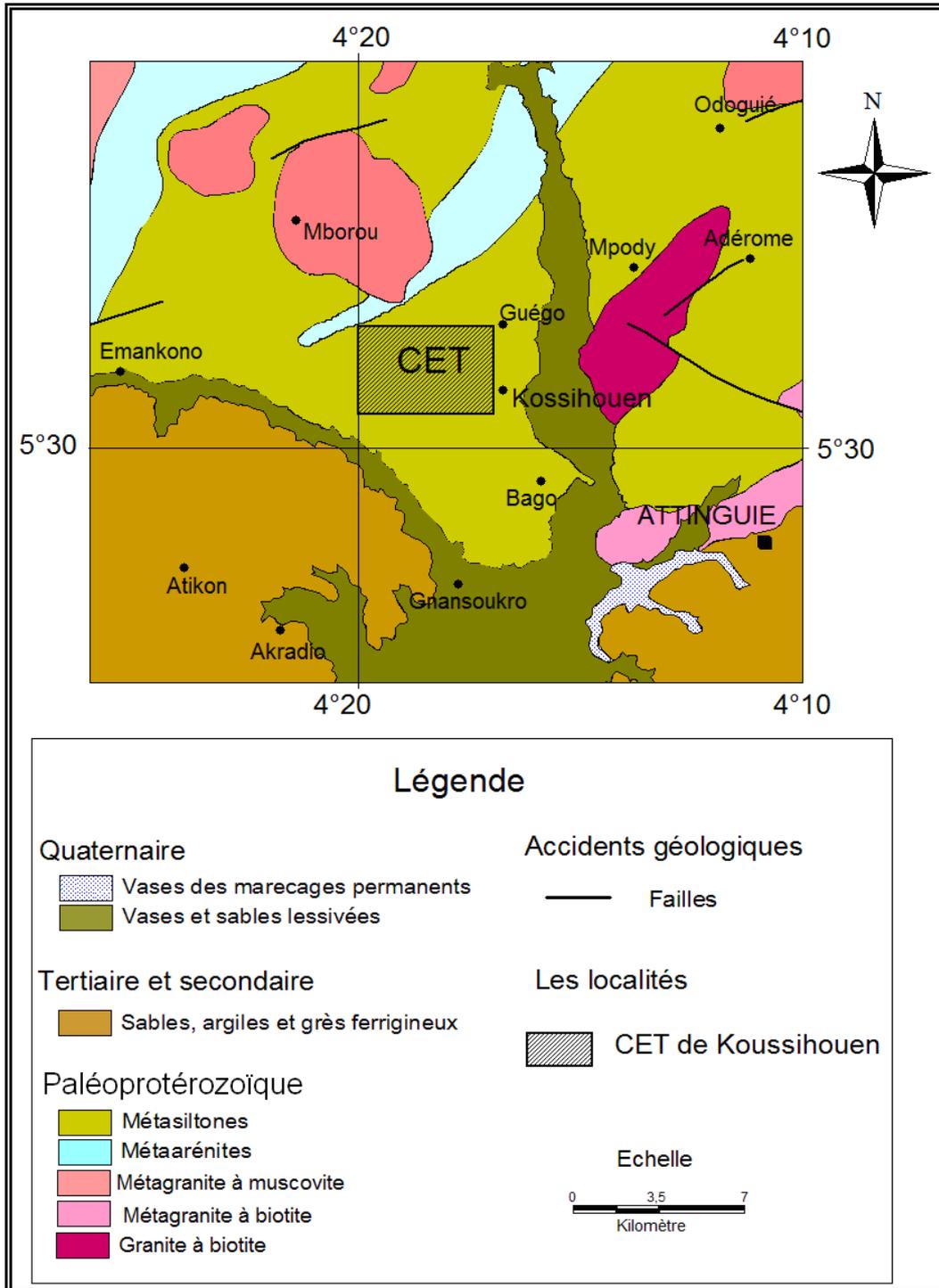


Figure 2 : Carte géologique du CET de Koussihouen.

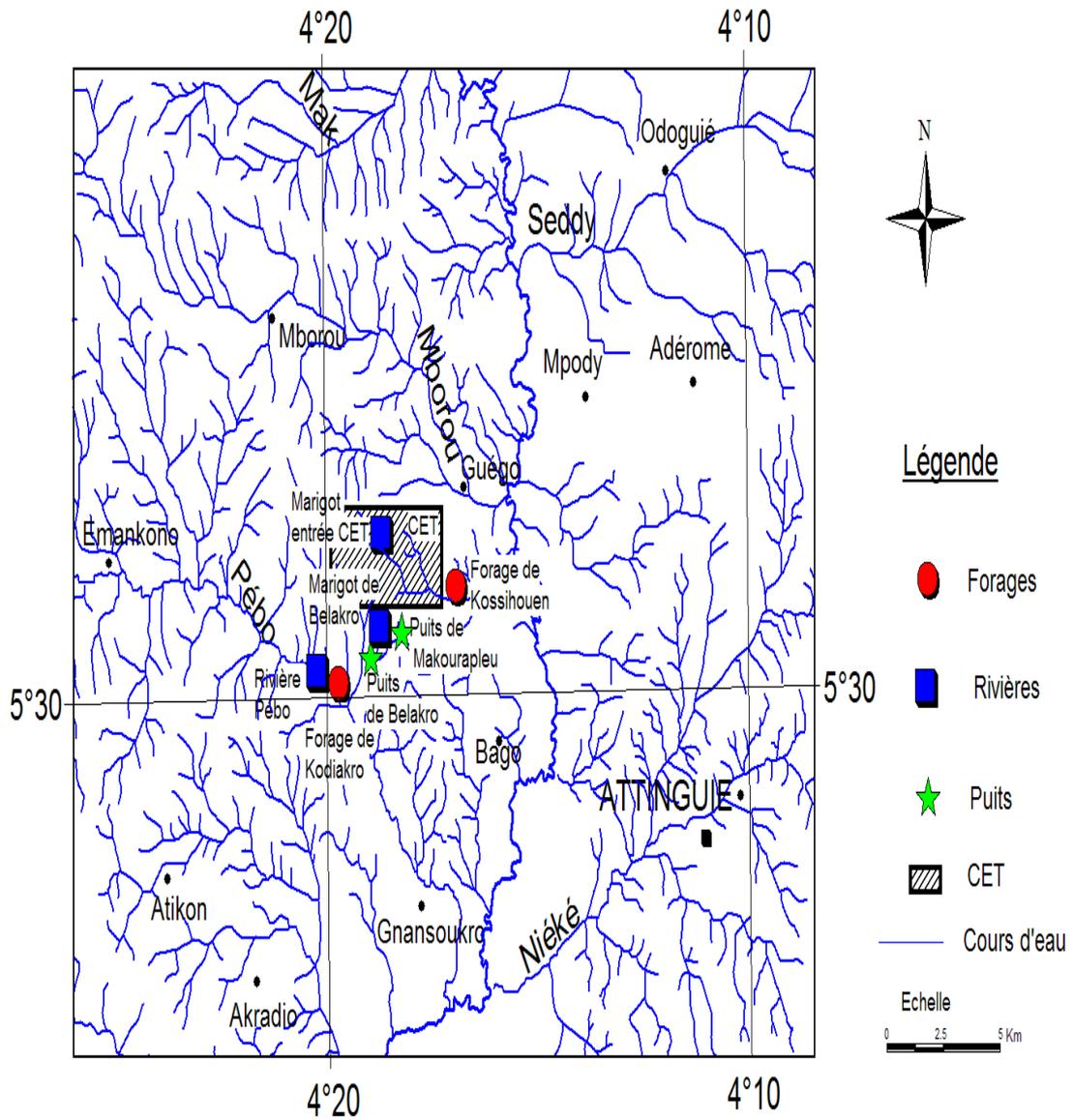


Figure 3 : Localisation des points de prélèvement.

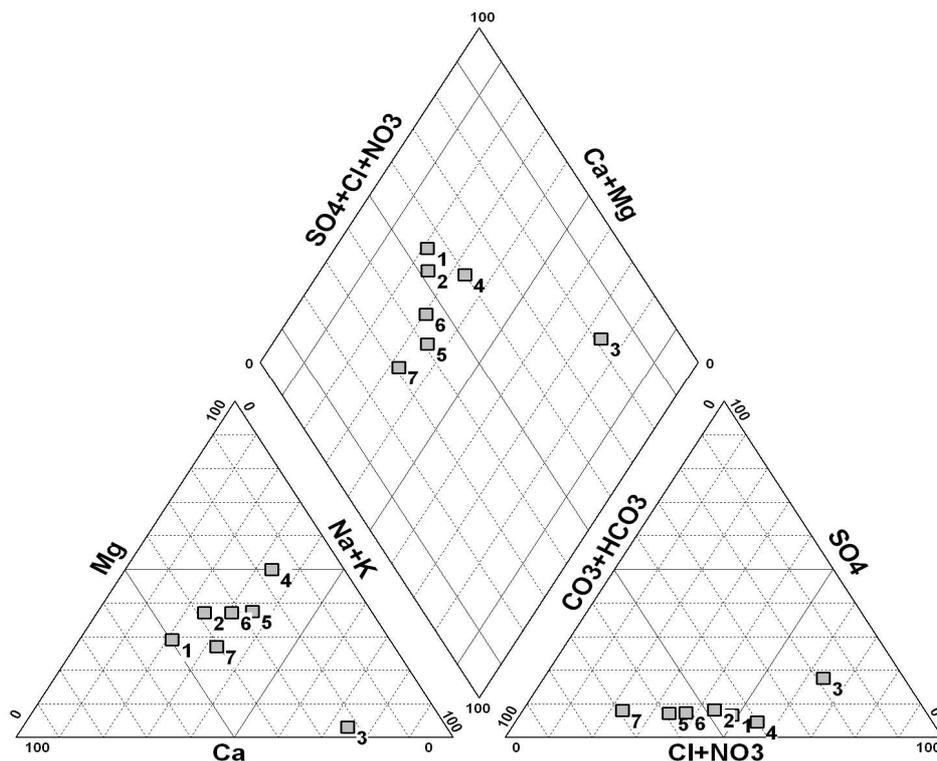
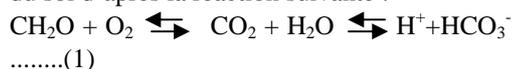


Figure 4 : Classification des eaux à partir du diagramme de Piper.

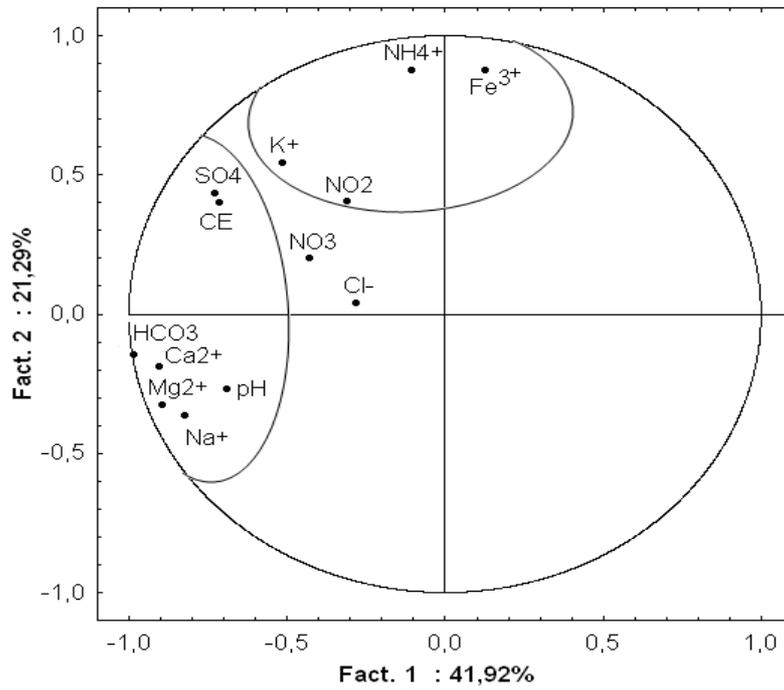
DISCUSSION

Les eaux de la zone d'étude ont une température basse qui varie entre 25,6 et 28,2 °C. Cette température qui correspond aux variations saisonnières des températures atmosphériques ambiantes s'inscrit dans l'intervalle des valeurs définies par Oga (1998), Ahoussi et al. (2010) dans les eaux souterraines de la région du Grand Abidjan (25,5 à 30,4 °C). Cela indique l'ouverture du système aquifère, donc de sa vulnérabilité vis-à-vis de la pollution (Tandia et al., 1999). Ces eaux sont agressives, avec un pH moyen de $6,19 \pm 0,24$. Cette acidité des eaux de surface et souterraines a été observée dans plusieurs régions de la Côte d'Ivoire. Il s'agit de la région d'Odiénné (Savané et al., 2001), de la région de Tiassalé (Oga et al., 2009), de la région d'Abidjan (Ahoussi et al., 2009), de la région des lacs (Soro, 2010) et de la région de San-Pédro (Lasm et al., 2011). En effet, selon

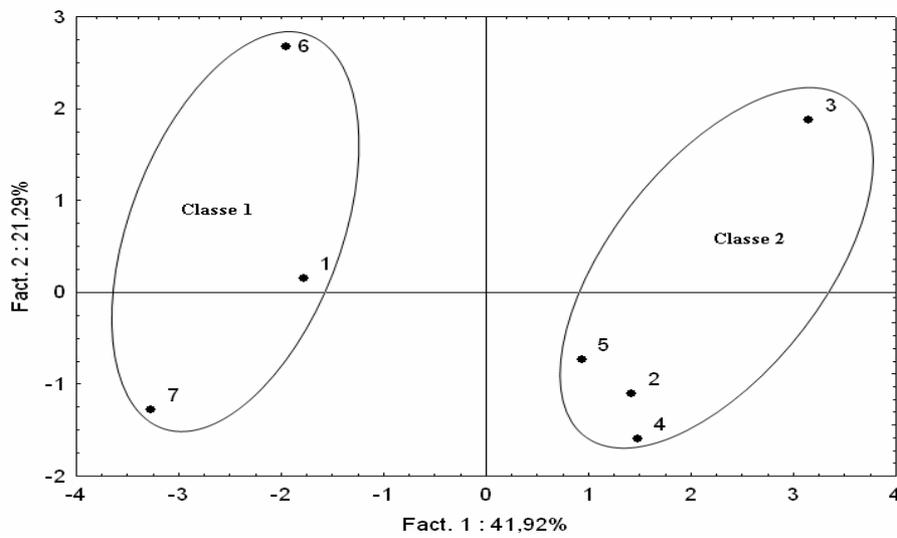
Tapsoba (1995) et Martini et al. (2009), l'acidité des eaux en zone tropicale humide est principalement liée à la décomposition de la matière organique végétale, avec la production de CO₂ dans les premières couches du sol d'après la réaction suivante :



Aussi, selon Faillat et Drogue (1993), la présence dans l'eau de CO₂ provenant des sols facilite-t-elle l'hydrolyse des minéraux silicatés et la formation des ions HCO₃⁻. C'est ce phénomène qui explique l'abondance des bicarbonates dans les eaux de la région. En effet, l'hydrolyse des minéraux silicates présents dans les roches constitue le principal mécanisme de production d'ions dans les eaux souterraines du site. Ce phénomène a été mis en évidence dans cette étude par les résultats des différentes analyses statistiques

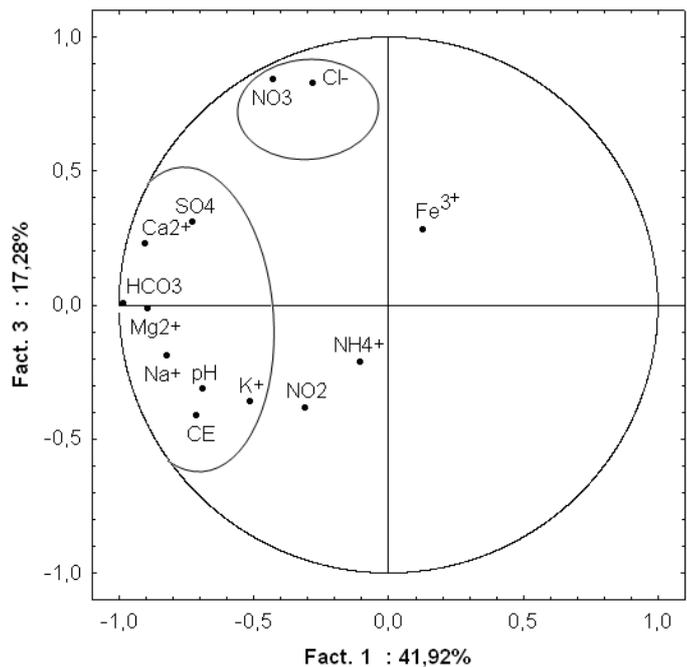


a) Espace des variables du plan factoriel F1-F2.

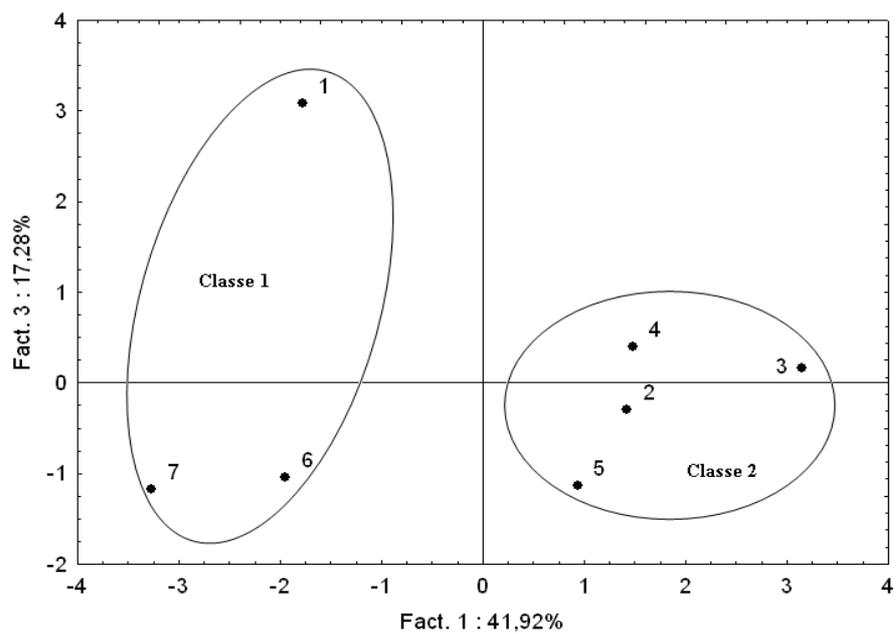


b) Espace des unités statistiques du plan factoriel F1-F2.

Figure 5 : Analyse en composantes principales des eaux du site du CET de Kossihouen dans le plan factoriel F1- F2.



a) Espace des variables du plan factoriel F1 – F3.



b) Espace des unités statistiques du plan factoriel F1 – F3.

Figure 6 : Analyse en composantes principales des eaux du site du CET de Kossihouen dans le plan factoriel F1-F3.

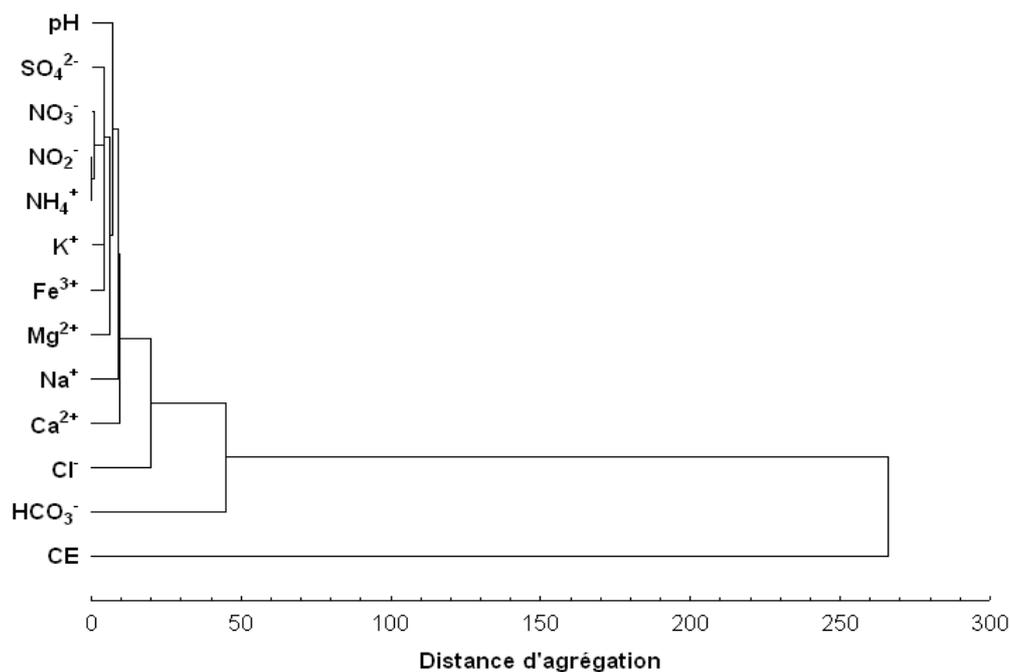


Figure 7 : Dendrogramme des eaux du site du CET de Kossihouen.

Tableau 1 : Résultats des analyses physico-chimiques exprimés en mg.L⁻¹.

Variables	Effectif	Moyenne	Min.	Max.	Ecart type	Erreur Standard sur la Moyenne (ESM)
T (°C)	7	26,57	25,60	28,20	0,85	0,32
pH	7	6,19	5,21	6,98	0,63	0,24
CE (µS.cm ⁻¹)	7	104,81	38,40	247	72,94	27,57
Eh (mv)	7	48,46	1,20	105,70	37,43	14,15
HCO ₃	7	24,43	4,00	42,00	12,77	4,82
TH	7	19,06	1,40	43,50	15,98	6,04
THT	7	4,00	1,00	7,00	2,16	0,82
SO ₄	7	2,91	1,80	4,00	0,89	0,34
NO ₃	7	0,16	0,01	0,75	0,26	0,10
NO ₂	7	0,03	0,00	0,05	0,02	0,01
Cl ⁻	7	11,71	7,00	21,00	5,22	1,97
Na ⁺	7	6,43	2,04	15,31	4,22	1,59
K ⁺	7	1,23	0,15	3,85	1,34	0,51
Ca ²⁺	7	7,62	0,56	17,40	6,39	2,42
Mg ²⁺	7	4,18	0,05	7,06	2,23	0,84
Fe ³⁺	7	1,59	0,40	3,60	1,21	0,46
NH ₄ ⁺	7	0,02	0,01	0,03	0,01	0

ESM : Erreur Standard sur la Moyenne

Tableau 2 : Valeurs propres.

Facteurs	Valeur propre	% Total de valeur propre	Cumul de valeur propre	% de variance exprimée cumulée
1	5,45	41,92	5,45	41,92
2	2,77	21,29	8,22	63,22
3	2,25	17,28	10,46	80,49

Tableau 3 : Contributions des variables basées sur les corrélations.

	Fact. 1	Fact. 2	Fact. 3
pH	0,09	0,03	0,04
CE	0,09	0,06	0,07
HCO ₃ ⁻	0,18	0,01	0,00
SO ₄ ²⁻	0,10	0,07	0,04
NO ₃ ⁻	0,03	0,01	0,32
NO ₂ ⁻	0,02	0,06	0,06
Cl ⁻	0,01	0,00	0,30
Na ⁺	0,13	0,05	0,02
K ⁺	0,05	0,11	0,06
Ca ²⁺	0,15	0,01	0,02
Mg ²⁺	0,15	0,04	0,00
Fe ³⁺	0,00	0,28	0,04
NH ₄ ⁺	0,00	0,28	0,02

multivariées. En Côte d'Ivoire, la minéralisation des eaux souterraines par l'hydrolyse des minéraux silicatés contenus dans les roches aquifères a été mise en évidence par les auteurs tels que Goné et al. (2008) dans la région d'Agboville, Kouassi et al. (2010) dans la région du N'zi-Comoé et Ahoussi et al. (2010) dans la région d'Abidjan-Agboville.

Ainsi en plus de la minéralisation des eaux par l'hydrolyse, l'Analyse en Composantes Principales a montré que deux autres phénomènes participent à la minéralisation des eaux de la zone d'étude. Il s'agit du pluviolessivage des sols et de l'intervention des activités anthropiques dans la pollution des eaux de surface et des eaux des nappes superficielles. La présence des

coliformes fécaux du type *Escherichia coli* dans les eaux de la zone d'étude rend compte de l'effet d'une pollution bactériologique récente à laquelle les eaux sont soumises. Dutka et al. (1990) associent l'abondance des coliformes fécaux dans une eau à une pollution bactérienne anthropique qui se produit lors des puisages par les populations. Boutin (1993) et El Asslouij et al. (2007) expliquent la présence des coliformes fécaux et des streptocoques 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. Les streptocoques et coliformes fécaux sont des indicateurs d'une pollution fécale et sont en grande partie d'origine humaine. La présence

Tableau 4 : Matrice de corrélation.

	pH	CE	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	Cl ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe ³⁺	NH ₄ ⁺
pH	1,00												
CE	0,39	1,00											
HCO₃⁻	0,73	0,66	1,00										
SO₄²⁻	0,22	0,47	0,61	1,00									
NO₃⁻	0,13	-0,01	0,40	0,65	1,00								
NO₂⁻	0,04	0,38	0,20	0,54	-0,18	1,00							
Cl⁻	-0,15	0,04	0,32	0,30	0,78	-0,38	1,00						
Na⁺	0,58	0,48	0,84	0,51	0,07	0,47	-0,01	1,00					
K⁺	0,55	0,78	0,47	0,29	0,11	0,17	0,01	0,10	1,00				
Ca²⁺	0,59	0,41	0,89	0,77	0,55	0,23	0,30	0,83	0,16	1,00			
Mg²⁺	0,63	0,63	0,95	0,42	0,27	0,04	0,36	0,83	0,34	0,80	1,00		
Fe³⁺	-0,39	0,02	-0,27	0,49	0,37	0,45	0,11	-0,38	0,20	-0,15	-0,49	1,00	
NH₄⁺	-0,09	0,64	-0,01	0,28	0,04	0,18	0,01	-0,32	0,73	-0,17	-0,11	0,55	1,00

Tableau 5 : Résultats des analyses microbiologiques des eaux souterraines.

N° Echantillon	2	3	4	5
Nature de l'échantillon	Eau du Puits de Makourapleu	Eau du Puits de Belakro	Eau du Forage de Kodiakro	Eau de la Rivière Pébo de Kodiakro
<i>Escherichia coli</i> /100ml	absence	absence	absence	presence
Streptocoques fécaux / 100ml	300	20	< 1	1700
<i>Clostridium perfringens</i> /20ml	8	< 1	< 1	400

des coliformes fécaux confirme l'influence des eaux du site du CET par les activités anthropiques. Aussi, l'origine fécale de la pollution des ressources en eau de la Côte d'Ivoire a-t-elle été mise en évidence par plusieurs auteurs tels que Abdoulaye (1995) et Claon (1997) dans les eaux souterraines des communes d'Adjamé, de Koumassi et de Port-Bouët, et Ahoussi et al. (2009) au niveau des eaux souterraines de la ville d'Abidjan. Les eaux de la zone d'étude sont soumises à une influence anthropique.

Conclusion

L'étude des caractéristiques hydrogéochimique et microbiologique des ressources en eau du site du Centre d'Enfouissement Technique (CET) de Kossihouen dans le District d'Abidjan en Côte d'Ivoire a été réalisée à partir de la combinaison des méthodes hydrochimiques, hydrogéologiques et de l'analyse statistique multivariée. Cette étude montre que les nappes phréatiques sont peu profondes, avec une profondeur moyenne de 5,96 m. Elle a conduit à la mise en évidence des différentes caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques des eaux souterraines et des eaux de surface du site. Du point de vue physique, la température des eaux de la zone d'étude varie entre 25,60 et 28,20 °C, avec une moyenne de $26,57 \pm 0,32$ °C. Le pH des eaux varie entre 5,21 et 6,98 unités pH, avec une moyenne de $6,19 \pm 0,24$ ce qui indique que les eaux du site sont acides. La conductivité électrique des eaux de la zone d'étude est faible et varie entre 38,40 et 247 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, avec une valeur moyenne de $104,81 \pm 27,57$ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Cette étude relève que les eaux souterraines du site du CET de Kossihouen sont douces, avec une moyenne de 4,17 °F. Les eaux du site du CET sont également riches en fer, avec des teneurs qui varient entre 0,40 et 3,60 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. La classification des résultats d'analyses chimiques obtenues à partir du diagramme triangulaire de Piper permet d'identifier trois groupes d'eau. Les eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes qui sont les plus importantes (57,14 %) des eaux étudiées, les eaux chlorurées calciques et magnésiennes (28,57%) et les eaux chlorurées sodi-

potassiques 14,29%, les moins importantes. Sur l'ensemble de la zone d'étude, les eaux sont caractérisées par une prédominance des ions bicarbonates sur les ions chlorures et les sulfates. Le calcium représente le cation le plus important, puis viennent ensuite Na^+ et K^+ .

L'Analyse en Composantes Principales et la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) indiquent que la minéralisation des eaux de la région est contrôlée par trois grands phénomènes. Il s'agit de la minéralisation temps de séjour ou l'hydrolyse pour les eaux souterraines (forages et puits), du pluviolessivage des sols pour les eaux superficielles (eaux de surface et eaux de puits) et de l'influence des activités humaines dans la production des déchets polluants. Par ailleurs, les eaux de la zone d'étude contiennent de forts taux de coliformes fécaux (*Escherichia coli*) et de streptocoques fécaux qui sont la conséquence d'une pollution d'origine humaine récente. Ainsi cette étude a montré que les ressources en eau du site de Kossihouen sont fortement influencées par les activités anthropiques de la zone qui pourraient contribuer à la dégradation de la qualité physico-chimique et bactériologique de ses ressources en eau.

REMERCIEMENTS

Les auteurs de cet article remercient sincèrement le Groupe Effort pour sa collaboration dans la réalisation de cette étude sur les eaux de la localité de Kossihouen, ainsi que les membres du Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau et de l'Environnement de l'UFR-STRM de l'Université de Cocody, Abidjan.

REFERENCES

- Abdoulaye S. 1995. Etude sanitaire des forages des stations de traitement du Plateau et d'Adjamé de la ville d'Abidjan. Thèse de Doctorat en pharmacie, Université d'Abidjan, Côte d'Ivoire, p. 140.
- Ahoussi K.E, Soro N, Soro G, Lasm T, Oga MS, 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 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, Université Nationale de Côte d'Ivoire, p. 480.
- BNETD. 2000. Actualisation Plan Directeur d'Assainissement et de Drainage de la ville d'Abidjan. Rapport préliminaire, p. 49.
- 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.
- Claon JS. 1997. Consommation d'eau de puits dans quatre communes de la ville d'Abidjan desservies par le réseau de distribution d'eau potable. Thèse de Doctorat en pharmacie, Université d'Abidjan, Côte d'Ivoire, p. 197.
- 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.
- Dutka BJ, Palmateer GA, Janzen EM, Sakellaris M. 1990. The presence of bacteria virus in groundwater and treated drinking water. *Environmental Pollution*, **63**: 293-298.
- 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.
- Faillat JP, Drogue C. 1993. Différenciation hydrochimique de nappes superposées d'altérites et de fissures en socle granitique. *Journal des Sciences Hydrologiques*, **3**(6): 215-229.
- Goné DL, Adja JT, Kamagaté B, Kouamé F, Koffi K., Savané I. 2008. Élimination du fer et du manganèse par aération – filtration des eaux de forage en zone rurale dans les pays en développement : cas de la région de Tiassalé (Sud de la Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, **19**(3): 558-567.
- 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.
- Jourda JP. 1987. Contribution à l'étude Géologique et Hydrogéologique du Grand Abidjan (Côte d'Ivoire). Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle, Université Scientifique, Technique et médicale de Grenoble, p. 319.
- 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 d'Université de Cocody, Abidjan, p. 227.
- Kouassi AM, Yao KA, Ahoussi KE, Seki LC, Yao NA, Biémi 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.
- 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.
- Lasme T, Lasme O, Oga MS, Youanta M, Baka D, Kouamé KF, Yao KT. 2011. Caractérisation hydrochimique des

- aquifères fissurés de la région de San-Pedro (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, **5**(2): 642-662.
- Matini L, Moutou JM, Kongo-Mantono MS. 2009. Evaluation hydrochimique des eaux souterraines en milieu urbain au Sud-Ouest de Brazzaville, Congo. *Afrique Science*, **5**(1): 82-98.
- Oga MS. 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, 311p.
- Oga MS, Marlin CH, Njitchoua R, Dever L, Filly A. 2008. Hydrochemical and isotopic characteristics of Coastal groundwater near Abidjan (Southern Ivory Coast). *IAH Hydrogeology*, **13**: 371-389.
- Oga MS, Lasm T, Yao TK, Soro N, Saley MB, 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.
- OMS 2008. *Guidelines for Drinking-water Quality* (Third edition, incorporating the first and second Addenda, Recommendations). OMS: Geneva, 1; 515.
- Sané Y. 1999. Une ville face à ses déchets ; une problématique géographique de la pollution à Abidjan (Côte d'Ivoire). Thèse de doctorat Université Laval, Québec, p. 290.
- Sané Y. 2002. La gestion des déchets à Abidjan : un problème récurrent et apparemment sans solution. *AJEAM/RAGÉE*, **4**(1): 13-22.
- Savané 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, p. 250.
- Soro N, Lasm T, Kouadio BH, Soro G, Ahoussi KE. 2006. Variabilité du régime pluviométrique du Sud de la Côte d'Ivoire et son impact sur l'alimentation de la nappe d'Abidjan. *Revue Sud Sciences Technologie*, **14**: 30-40.
- Soro N, Ouattara L, Dongo K., Kouadio KE, Ahoussi KE, Soro G, Oga YM-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**(2): 364-384.
- Tandia AA, Diop ES, Gaye CB. 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.
- 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 3^{ème} cycle de l'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 sahélienne d'Afrique de l'Ouest. *Revue d'Hydrogéologie*, **1**: 13-21.
- Yermani M, Zouari K, Michelot JL, 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 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.