



Origines et modélisation de la minéralisation des eaux du Quaternaire d'Abidjan (Sud de la Côte d'Ivoire)

Aristide Gountôh DOUAGUI ^{1*}, Innocent Kouassi KOUAME ¹, Kouadio KOFFI ¹,
Brou DIBI ¹, Félix Koffi KONAN ² et Issiaka SAVANE ¹

¹ Laboratoire de Géoscience et Environnement, UFR - SGE, Université d'Abobo-Adjamé, 02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire.

² Laboratoire Environnement et Biologie aquatique, UFR-SGE, Université d'Abobo-Adjamé, 02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire.

*Auteur correspondant, E-mail: douaguiaristide@yahoo.fr

RESUME

Les eaux de 61 puits au sud du District d'Abidjan ont été caractérisées afin de connaître la variabilité spatiale de la minéralisation des eaux du Quaternaire. Le variogramme et le krigeage ordinaire ont été utilisés pour analyser la distribution spatiale de la minéralisation. La détermination des facteurs qui gouvernent cette minéralisation s'est faite à partir de l'algorithme de Kohonen et du calcul de l'indice d'échange de base. Les eaux des zones urbanisées (Treichville, Marcory, Koumassi et Port-Bouët) et celles situées en bordure de mer et des lagunes sont fortement minéralisées tandis que les zones rurales sont caractérisées par des eaux de faible minéralisation. Quatre facteurs expliquent cette répartition spatiale de la minéralisation : les échanges de bases et la dissolution des sels marins sont observés sur l'ensemble du site ; en revanche, la pollution anthropique et l'intrusion d'eaux marine et lagunaire traduites respectivement par les fortes concentrations de nitrate et de chlorure, affectent les eaux des zones urbanisées et celles en bordure des lagunes et de l'océan atlantique.

© 2009 International Formulae Group. All rights reserved.

Mots clés: Nappe côtière, conductivité électrique, sels marins, pollution marine et lagunaire, pollution anthropique.

INTRODUCTION

Dans les milieux côtiers, le phénomène de salinisation rend difficile l'exploitation domestique des eaux douces par les populations. La forte minéralisation des nappes côtières est liée généralement à l'intrusion d'eaux marines (Shammas et Jacks, 2007 ; Xun et al., 2008). Cette intrusion est marquée par de fortes concentrations de chlorure dans les eaux en bordure de mer.

Outre l'intrusion d'eau marine, il est fait état dans la littérature (Daesslé et al., 2005 ; Trabelsi et al., 2005 ; El Moujabber et al., 2006 ; Daskalaki et Voudouris, 2008 ; Terzić et al. 2008), d'un apport de sels dû à la dissolution d'embruns marins, aux échanges

cationiques et à la pollution d'origine anthropique.

La minéralisation des eaux est souvent évaluée par la mesure de la conductivité électrique (D'Alessandro et al., 2008 ; Ligban et al., 2009). Cela est dû au fait que la plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement.

En Côte d'Ivoire, en particulier dans le District d'Abidjan, les champs captants servant à l'approvisionnement en eau potable des populations sont situés sur le Continental Terminal où les profondeurs des forages atteignent en moyenne 80 m. Malgré ces profondeurs importantes, les forages du champ captant situé dans la commune du

Plateau ont dû être abandonnés à cause de leur forte minéralisation (conductivité électrique comprise entre 7000 et 10500 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Les études de Sogr eah (1996), ont montr e que le taux élevée de sels dissous des eaux de ce champ captant était liée à une intrusion marine. Au niveau de la nappe du Quaternaire, située dans la partie sud du District, des études récentes (Issiaka et al., 2006) ont montr e, en certains endroits du secteur qui s'étend du canal de Vridi   Grand-Bassam, une minéralisation importante avec des conductivités électriques atteignant parfois 4360 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Par ailleurs, l'analyse de la structure géologique dudit secteur laisse entrevoir des risques de pollution par les effluents des systèmes d'évacuation, et des fosses septiques, les dépôts d'ordures, ainsi que les eaux de pluies chargées de sels, et des risques de pollution liée à l'appel d'eau saumâtre lagunaire (Oga et al., 1998). Toutefois, les processus spécifiques à la minéralisation des eaux de cette région restent peu connus alors que ces eaux constituent une des sources principales d'approvisionnement en eau de boisson des populations.

Cette étude vise à rechercher les origines de la minéralisation des eaux du Quaternaire du secteur « Canal de Vridi - Grand-Bassam. Il s'agit, d'une part, de connaître la distribution spatiale de la minéralisation et d'autre part, de rechercher les origines liées à cette distribution. Pour

atteindre cet objectif, des analyses physico-chimiques et bactériologiques des eaux de 61 puits ont été effectuées.

MATERIEL ET METHODES

Description du site d'étude

Le site d'étude, situé au Sud de la Côte d'Ivoire, couvre tout le secteur compris entre les latitudes 5 12'5''Nord et 5 20'15''Nord et les longitudes 4 4'57''Ouest et 3 43'19''Ouest. Il est limité au Sud par l'Océan Atlantique et la lagune Ouladine, au Nord par la lagune Ebrié, à l'Est par la lagune Potou et la lagune Ouladine et à l'Ouest, par la lagune Ebrié et le canal de Vridi (Figure 1). Ce site englobe les communes de Treichville, Marcory, Koumassi, Port-Bouët et Grand-bassam. Celles-ci sont soumises à un climat équatorial de transition qui comprend quatre saisons subdivisées en une grande saison sèche (décembre-avril), une grande saison des pluies (mai-juillet), une petite saison sèche (août-septembre) et une petite saison des pluies (octobre-novembre). Sur le plan géologique, la zone d'étude se situe dans la partie sud du bassin sédimentaire côtier ivoirien où affleure le Quaternaire. On y reconnaît plusieurs unités sédimentaires. Les sables argileux des bas plateaux se présentent en bandes massives et forment des surfaces planes situées entre 10 et 12 m d'altitude. Les sables grossiers affleurent sous forme de cordons littoraux. Les sables vaseux et

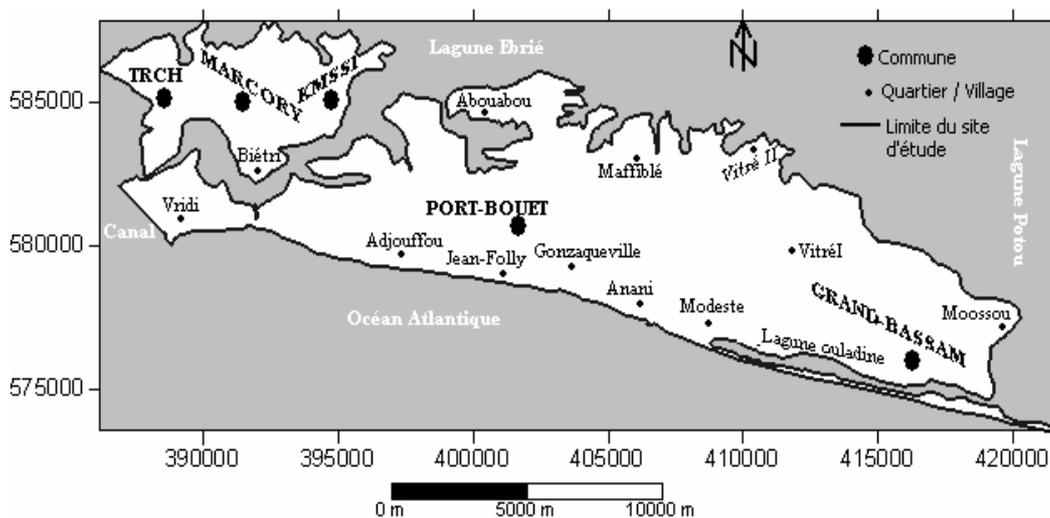


Figure 1: Présentation de la zone d'étude : TRCH= Treichville; KMSSI= Koumassi.

fluviatiles présentent une grande variété lithologique où tous les intermédiaires existent entre les sables plus ou moins grossiers, les vases et argiles et les tourbes (Delor et al., 1992). Les sables des cordons marins et les sables argileux quaternaires renferment des eaux douces connues sous le nom de "nappe du Quaternaire". La perméabilité des terrains superficiels dans lesquels se développe la nappe du quaternaire se situe entre 10^{-4} m.s⁻¹ et 10^{-3} m.s⁻¹ pour les sables argileux et 10^{-3} m.s⁻¹ pour les sables des cordons marins (Issiaka et al., 2006). L'écoulement de l'eau dans cet aquifère est facile et la vitesse de celle-ci peut y être considérée comme uniforme.

Prélèvement et analyse des échantillons

Les échantillons d'eau ont été prélevés sur l'année 2007 pendant les mois de mars et de juillet correspondant respectivement à la grande saison sèche et la grande saison de pluies. L'échantillonnage a porté sur soixante et un (61) puits dont les eaux servent à l'alimentation en eau de boisson des populations (Figure 2).

Le prélèvement des eaux s'est effectué à l'aide d'un flacon en verre relié à une corde. Le flacon a été préalablement stérilisé à l'autoclave. Les échantillons ont été recueillis dans des flacons en verre stériles de 500 mL. Ainsi, en chaque point de prélèvement, trois lots d'échantillons ont été collectés. Il s'agit de 500 mL d'eau filtrées (filtres de 0,45 µm) pour le dosage des anions, 500 mL d'eau filtrées et acidifiées avec l'acide sulfurique 1N

pour le dosage des cations et 500 mL d'eau pour la recherche des germes bactériologiques. Tous les échantillons ont été acheminés au laboratoire dans une enceinte réfrigérante et conservés à 4 °C. Les analyses bactériologiques et chimiques ont été effectuées respectivement dans les 6 heures et 12 heures qui ont suivi le prélèvement des échantillons.

Les eaux de pluie ont aussi été collectées dans les différentes communes de la zone d'étude et analysées.

Le dosage des anions (Cl⁻, NO₃⁻, NO₂⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻, PO₄³⁻) et des cations (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, NH₄⁺) s'est effectué suivant les méthodes indiquées dans le tableau 1.

La recherche et le dénombrement, en milieux solides, des coliformes totaux et thermotolérants ont été effectués par la méthode de filtration sur membrane suivant la norme NFT 90-414. La conductivité électrique a été mesurée *in situ* à l'aide de conductivimètre de marque HANNA, type HI 90-32.

Analyse de la distribution spatiale de la minéralisation des eaux souterraines.

L'analyse de la structure spatiale de la minéralisation a été réalisée à partir des données de conductivité des eaux des grandes saisons sèche (mars) et de pluie (juillet). Pour ce faire, l'approche probabiliste développée par Matheron (1970), basée sur la théorie des variables régionalisée, a été appliquée. Cette approche prend en compte la structuration spatiale et la configuration de l'échantillon.

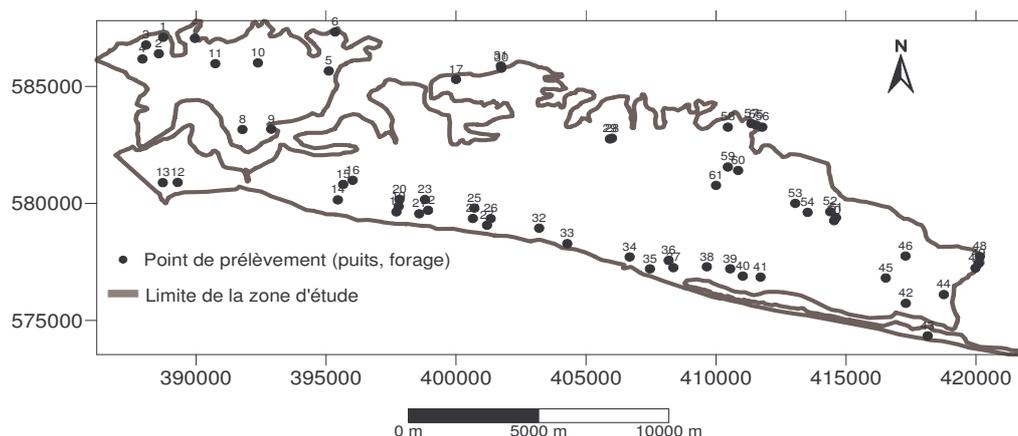


Figure 2: Localisation des points de prélèvement d'eau.

Tableau 1 : Méthodes d'analyse des paramètres chimiques

Paramètre	Méthode d'analyse	Norme
Nitrate	Colorimétrie	NF T 90 013
Nitrite	Colorimétrie	NF T 90 012
Ammonium	Colorimétrie	NF T 90 015
Phosphate	Colorimétrie	NF T 90 023
Potassium	Absorption atomique	NF T 90 020
Sodium	Absorption atomique	NF T 90 020
Sulfate	Néphélométrie	NF T 90 040
Chlorure	Titimétrie	NF T 90 014
Calcium/Magnésium	Absorption atomique	NF T 90 112
Hydrogencarbonate	Titimétrie	NF T 90 036

La structuration spatiale permet d'estimer, à partir des mesures ponctuelles, les valeurs de la conductivité des eaux les plus probables en tout point du site pendant les deux saisons. A cet effet, la corrélation entre la valeur de la conductivité en une position X et cette même valeur décalée d'un vecteur h éventuellement directionnel apparaît comme un moyen d'accéder à la structuration spatiale des concentrations de sels dissous. Cette analyse se fait à l'aide du variogramme qui caractérise, en fonction de la distance, la corrélation entre un point et ses voisins.

Expérimentalement, il est calculé à partir de la formule 1:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \dots\dots\dots(1)$$

où $\gamma(h)$ représente la covariance, $N(h)$, le nombre de paires dont les points sont espacés de h; $Z(x_i)$ et $Z(x_i+h)$ sont les valeurs de conductivité aux points x_i et x_i+h .

L'examen de l'allure du variogramme donne des renseignements sur la nature des variations. Aussi, ses paramètres que sont la portée (a), le palier (C) et l'effet de pépité (C_0) rendent compte de l'échelle d'investigation et de l'amplitude de ces mêmes variations (Assaf et Saadeh, 2008; Soro et al., 2004). Ceux-ci sont obtenus après ajustement du variogramme expérimental à une expression analytique ou modèle. Dans cette étude, les modèles sphérique, exponentiel, gaussien, cubique et sinusoïdal, les plus utilisés, ont été testés. Aussi, les transformées logarithmiques

(Ln) des valeurs de conductivité dont la distribution suit une loi normale, ont été utilisées. Le modèle qui présente la plus faible somme des moindres carrés pondérés lors du calage du variogramme, a servi à estimer, à partir du krigeage ordinaire, les valeurs de conductivité sur l'ensemble du site d'étude.

La qualité et la cohérence des estimations ont été évaluées sur la base des valeurs de la moyenne des erreurs (Me) et de la variance réduite des erreurs (σ_{re}).

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z^*(x_i) - Z(x_i) \dots\dots\dots(2)$$

$$\sigma_{RE} = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Z^*(x_i) - Z(x_i)}{\sigma^*} \right)^2 \right)^{0.5} \dots\dots(3)$$

ME: moyenne des erreurs; σ_{re} : variance réduite des erreurs; n: nombre de points de mesure; $Z(x_i)$: valeur de conductivité au point x_i ; $Z^*(x_i)$: valeur estimée de la conductivité au point x_i ; $\sigma^*(x_i)$: variance des erreurs au point x_i .

Si les valeurs de M_e et σ_{re} sont respectivement proches de 0 et 1, alors l'estimation est dite bonne.

Les logiciels R2.9.0 et ArcView3.2 ont été utilisés respectivement pour l'analyse de la structure spatiale et la cartographie.

Caractérisation des processus de minéralisation des eaux du Quaternaire

Les différents processus intervenant dans la minéralisation des eaux ont été déterminés à partir des corrélations obtenues entre la conductivité et les paramètres

physico-chimiques et bactériologiques d'une part, et du calcul de l'indice d'échange de base, d'autre part.

Les corrélations ont été déterminées en utilisant l'algorithme des cartes auto-organisatrices (Self Organizing Maps ou SOM). Le principe de l'algorithme des SOM consiste à effectuer une classification non linéaire des bases de données complexes en identifiant des groupes semblables. Ainsi, à partir d'un apprentissage non supervisé, cet algorithme recherche itérativement des similarités parmi les données observées et les représente sur une carte de sortie (ou carte de Kohonen) en préservant les voisinages (Peeters et al., 2006). L'apprentissage se fait avec différentes tailles de carte et la taille optimale est choisie en minimisant les erreurs dites de quantification (QE) et de topographie (TE) (Konan et al., 2006 ; Park et al., 2003). L'architecture de l'algorithme des SOM se compose d'une couche d'entrée et d'une couche de sortie. Dans le cadre de cette étude, la couche d'entrée est constituée de 14 neurones représentés par les 14 paramètres physico-chimiques et bactériologiques pris en compte. Ces neurones sont connectés à chacun des 122 échantillons ou vecteurs (61 échantillons d'eau prélevés en mars et juillet : 61× 2) de la base de données. La couche bidimensionnelle de sortie est composée de 36 neurones (6 lignes × 6 colonnes). Cette taille a été choisie pour la carte de sortie car elle minimise les deux types d'erreurs (QE=0,428 et TE=0,00). Une fois la carte de Kohonen obtenue, un algorithme d'analyse de classification hiérarchique basée sur la méthode Ward et la distance Euclidienne permet de mettre en évidence des assemblages des objets réels sur la carte. Ces regroupements sont effectués sur la base des affinités en termes de composantes analytiques des échantillons projetées dans les cellules de couche de sortie.

A l'aide du test de corrélation de Spearman, les coefficients de liaison ont été calculés entre les variables.

La SOM Toolbox (version 2) pour Matlab® a été utilisée.

L'indice d'échange de base (I.E.B) de chaque échantillon d'eau a permis de caractériser les réactions d'échanges ioniques entre la nappe et l'aquifère. L'IEB, défini par Schoeller

(1934), cité par Bouziane et Labadi (2009), est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existant dans l'eau. Il est donné par l'expression suivante:

$$IEB = \frac{{}_rCl^- - {}_r(Na^+ + K^+)}{{}_rCl^-} \dots\dots\dots(4)$$

où IEB représentant l'indice d'échange de base est sans unité ; ${}_rCl^-$ est la concentration en milliequivalent des ions chlorures, ${}_r(Na^+ + K^+)$ est la concentration en milliequivalent de la somme des ions sodium et potassium.

Cet indice définit le sens des échanges ioniques entre l'eau et les terrains encaissants (Bouziane et Labadi, 2009 ; Ahoussi, 2008). Ainsi, si I.E.B = 0 alors il n'y a pas d'échanges, si I.E.B < 0 alors Ca^{++} et Mg^{++} sont échangés par Na^+ et K^+ et si I.E.B > 0 alors Na^+ et K^+ sont échangés par Ca^{++} et Mg^{++} .

RESULTATS

Distribution spatiale de la minéralisation

Les paramètres de régionalisation des conductivités des eaux sont reportés dans le tableau 2. L'analyse des sommes des moindres carrés pondérés (SMCP) indique que le modèle sphérique ajuste mieux les variogrammes expérimentaux des grandes saisons sèche et de pluie (Figure 3). Ce modèle minimise la SMCP, le critère d'ajustement sur les deux saisons. Ainsi, les valeurs de conductivité des eaux sont corrélées les unes aux autres sur les distances de 8,18 km et 9,353 km respectivement en périodes sèche et pluvieuse. Au-delà de ces distances, les différentes valeurs deviennent indépendantes et aucune structuration n'est observée dans la répartition des conductivités.

La moyenne des erreurs et la variance réduite des erreurs des estimations de la conductivité électrique sur les deux saisons sont respectivement proches de 0 (saison sèche : 0,057; saison de pluie : 0,024) et de 1 (saison sèche : 1,02; saison de pluie : 0,987). Ce qui indique que l'estimation de la conductivité électrique par krigeage est satisfaisante.

Tableau 2 : Paramètres de régionalisation de la conductivité électrique :

Modèle	Mars				Juillet			
	Effet de pépité	Palier	Portée (Km)	SMCP	Effet de pépité	Palier	Portée (Km)	SMCP
Sphérique	0,1	0,72	8,18	13,75	0,13	0,60	9,353	0,83
Exponentiel	0,135	1,05	8,18	14,10	0,159	0,99	9,353	1,33
Gaussien	0,33	0,88	8,18	19,49	0,30	1,04	9,353	3,94
Cubique	0,06	0,73	8,18	14,9	0,123	0,72	9,353	1,65
Sinusoïdal	0,44	1,61	8,18	24,24	0,374	1,78	9,353	7,74
Circulaire	0,07	0,76	8,18	13,84	0,13	0,62	9,353	0,93

Le modèle sphérique (en gras) qui donne les plus petites valeurs des sommes des moindres carrés pondérés (SMCP) a été choisi pour les variogrammes modélisés.

La distribution spatiale de la conductivité électrique au cours des grandes saisons sèche et de pluie met en évidence deux zones majeures (Figures 4). La première, regroupant les secteurs urbanisés (Treichville, Marcory, Koumassi, Vridi, Adjouffou et Moossou) et ceux en bordure de lagune et de l'océan Atlantique, se caractérise par des eaux fortement minéralisées avec des conductivités comprises entre à 676 et 1374,48 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. En revanche, la seconde zone caractérisée par des conductivités plus faibles (50-400 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), est composée des eaux prélevées à Port-Bouët et Grand-Bassam.

Corrélation entre la conductivité électrique et les paramètres physico-chimiques et bactériologiques

Quatre groupes d'eau se dégagent de la distribution des échantillons sur la carte de Kohonen en fonction de la prédominance des paramètres physico-chimiques et bactériologiques (Figures 5 et 6). Les eaux du groupe I, prélevées à Biétri, Vridi et Moossou, sont caractérisées par de fortes conductivités électriques associées aux teneurs élevées des ions hydrogénocarbonate, nitrite, orthophosphate et ammonium, et à l'abondance des germes fécaux. Le degré de liaison entre ces ions et, d'une part la conductivité et, d'autre part, les coliformes thermotolérants (Tableau 3) indiquent leur contribution significative à la conductivité et proviendraient des apports d'origine superficielle. Les eaux du second

groupe se distinguent par des conductivités élevées associées d'une part, aux fortes concentrations de nitrate, sulfate et sodium et d'autre part, aux fortes concentrations de chlorure, potassium et magnésium. Les corrélations significatives entre la conductivité et NO_3^- ($r = 0,685$; $p < 0,01$), faiblement présents dans les eaux de pluie du site (0,032-0,130 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), Cl^- ($r = 0,358$; $p < 0,01$), abondants dans les eaux de pluie (39,050-71,000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), Na^+ ($r = 0,384$; $p < 0,01$), SO_4^{2-} ($r = 0,579$; $p < 0,01$), K^+ ($r = 0,468$; $p < 0,01$), Mg^{2+} ($r = 0,437$; $p < 0,01$); et celles obtenues entre ces ions ($\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$: $r = 0,389$; $p < 0,01$ - $\text{NO}_3^-/\text{Mg}^{2+}$: $r = 0,341$; $p < 0,01$ - NO_3^-/K^+ : $r = 0,327$; $p < 0,01$ - $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$: $r = 0,382$; $p < 0,01$ - $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$: $r = 0,328$; $p < 0,05$) suggèrent trois pôles de minéralisation. Il s'agit de la pollution anthropique liée aux fortes concentrations des nitrates, la pollution marine et l'apport atmosphérique, liés aux concentrations des ions chlorure et sodium. Les eaux correspondant à ce groupe sont celles prélevées à Treichville, Koumassi, Marcory, Adjouffou, Jean Folly et Grand-Bassam. Les eaux des groupes 3 et 4 présentent une composition physico-chimique similaire et sont caractérisées par de faibles conductivités et des concentrations en anions et cations généralement faibles. Ces eaux sont constituées, en majorité des eaux prélevées dans les zones rurales et celles éloignées des lagunes et de l'océan.

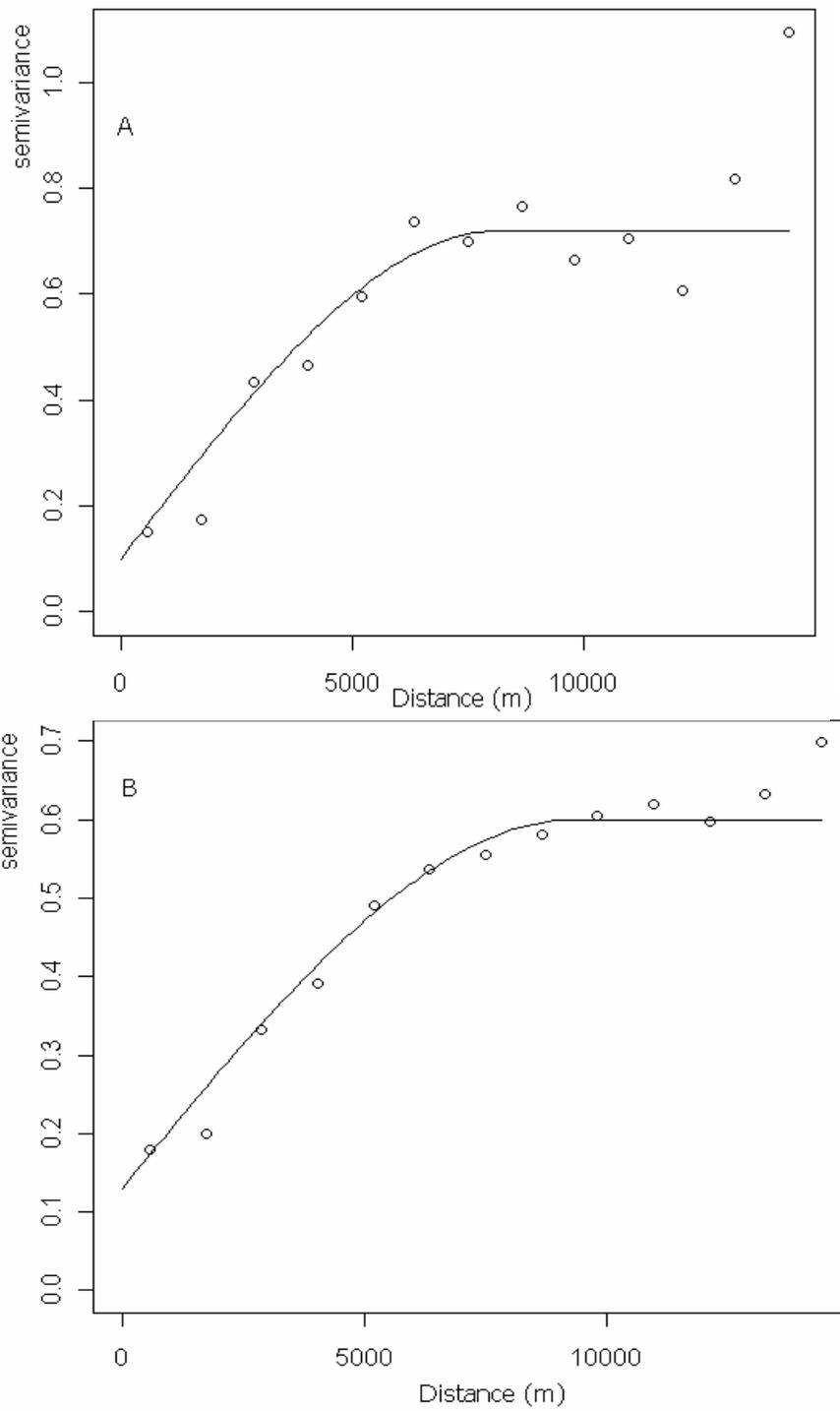


Figure 3 : Variogrammes modélisés des conductivités électriques des grandes saisons sèche (A) et de pluie (B) à partir du modèle sphérique.

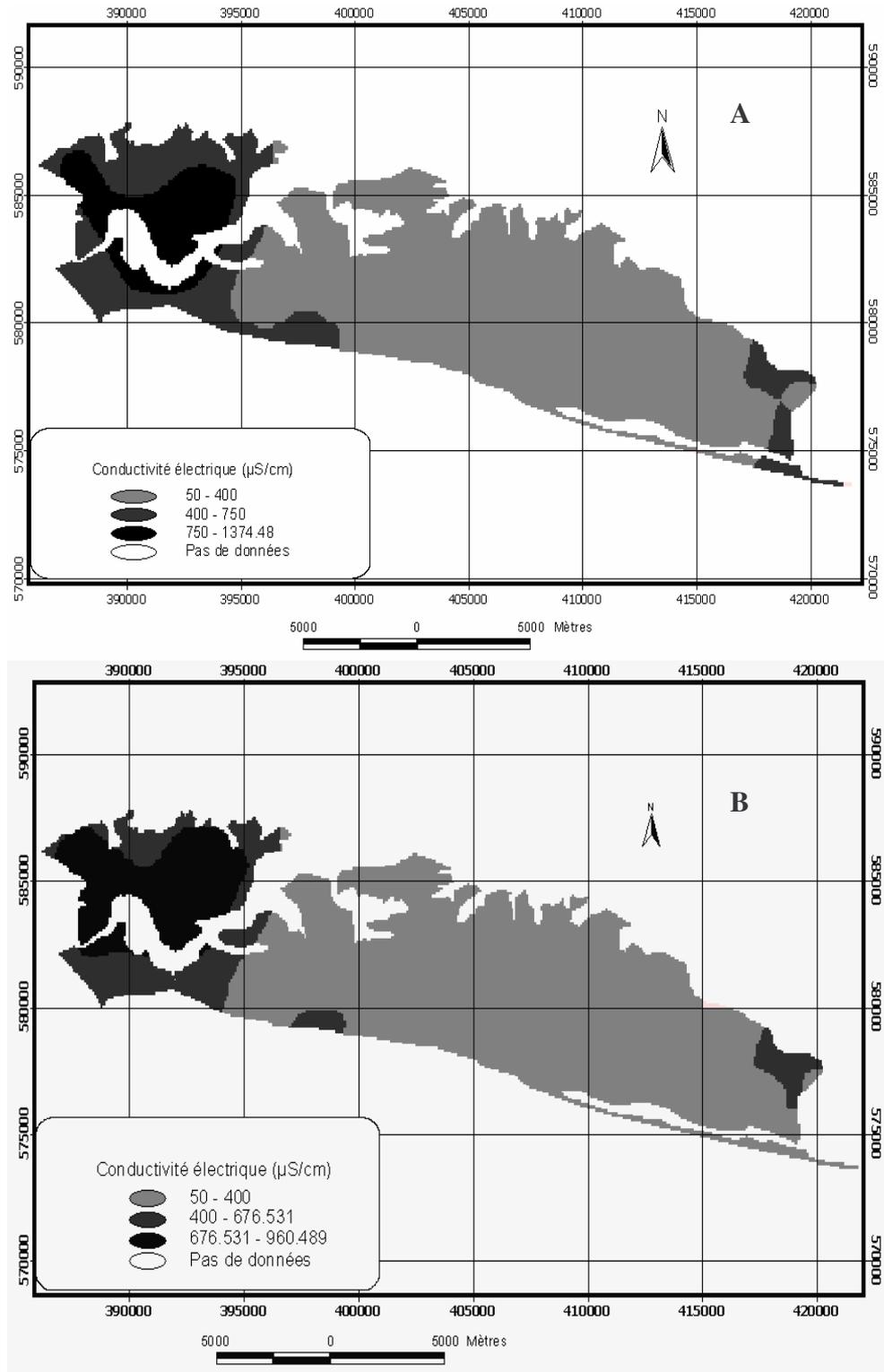


Figure 4 : Carte d'estimation de la conductivité électrique des eaux des grandes saisons sèche (A : mars 2007) et de pluie (B : Juillet 2007) du secteur sud du District d'Abidjan.

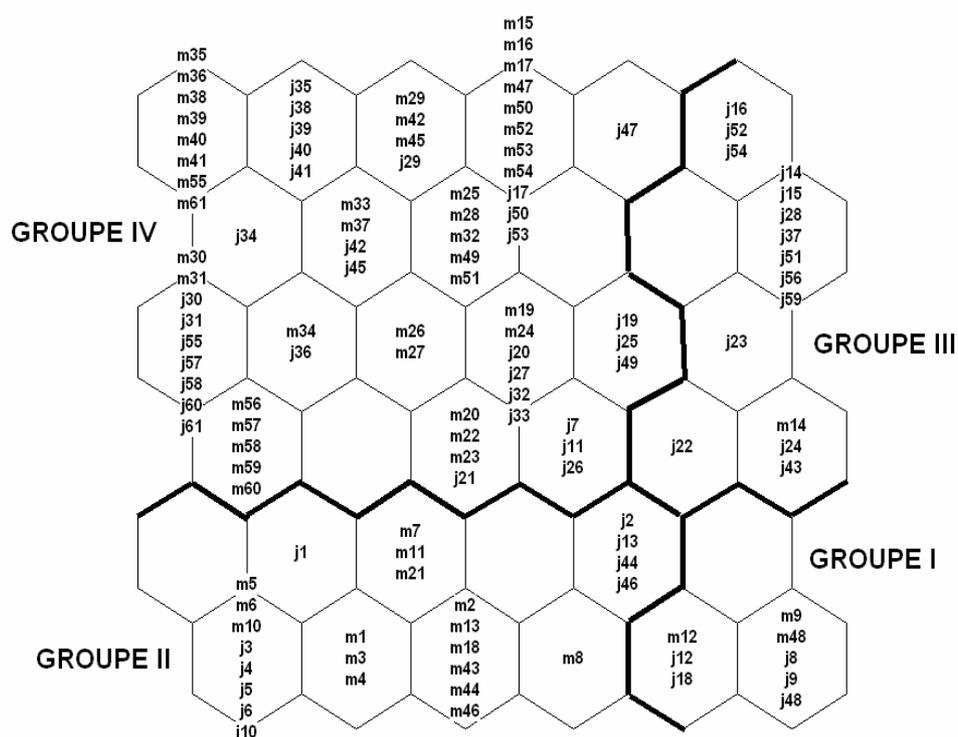


Figure 5 : Répartition des échantillons sur la carte de Kohonen à partir des variables physico-chimiques et bactériologiques : m et j correspondent aux prélèvements effectués respectivement en mars et juillet 2007.

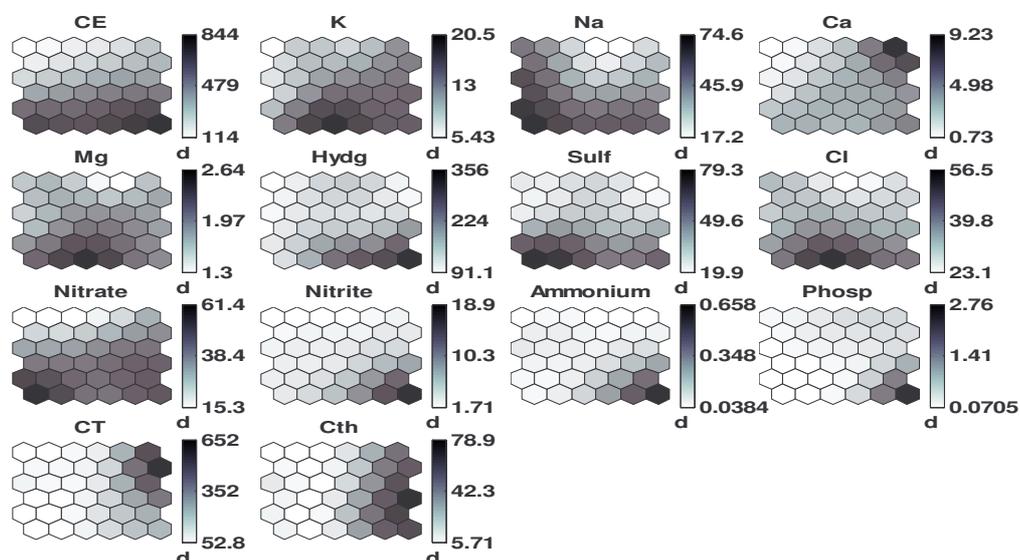


Figure 6 : Gradient de valeurs des paramètres physico-chimiques et bactériologiques sur la carte de Kohone : CE=conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$); Hydg=hydrogénocarbonate ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); Sulf=sulfate ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); Phosp=orthophosphate ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$); CT=coliformes totaux (UFC/100 mL), Cth= coliformes thermotolérants (UFC/100 mL) (d= échelle ; couleur foncée = valeurs fortes ; couleur claire = valeurs faibles).

Tableau 3: Coefficients de corrélation (r) de Spearman entre les concentrations des paramètres physico-chimiques et bactériologiques.

	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻	K ⁺	CE	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	CT	CTh
NO ₃ ⁻	1	0,321**	0,366**	-	0,327**	0,685**	0,389**	0,431**	0,341**	-	0,382**	0,165*	0,190*	0,189*
NO ₂ ⁻		1	0,411**	0,379**	0,382**	0,475**	0,205*	-	0,328**	0,304**	0,360**	0,213*	0,322**	0,229*
NH ₄ ⁺			1	0,501**	0,425**	0,435**	-	-	0,310**	0,345**	0,380**	0,218*	0,301**	0,308**
PO ₄ ³⁻				1	0,370**	-	-0,205*	-	-	0,357**	-	0,230*	-	-
K ⁺					1	0,468**	-	0,397**	0,632**	0,218*	-	0,222*	0,354**	0,218*
CE						1	0,384**	0,488**	0,437**	0,372**	0,579**	0,358**	0,219*	-
Na ⁺							1	-	-	-	0,192	0,228*	-	-
Ca ²⁺								1	0,303**	-	0,224	-	-	-
Mg ²⁺									1	-	0,352**	0,443**	-	-
HCO ₃ ⁻										1	0,216	0,397**	-	-
SO ₄ ²⁻											1	0,370**	-	-
Cl ⁻												1	-	-
CT													1	0,655**
CTh														1

CE= conductivité électrique ; CT = coliformes totaux ; CTh = coliformes thermotolérants ;
 N = 122 observations ; - : $p > 0,05$; * : $p < 0,05$ pour $0,165 \leq |r| < 0,301$; ** : $p < 0,01$ pour $|r| \geq 0,301$.

Caractérisation des échanges ioniques entre la nappe et l'aquifère

L'indice d'échange de base des eaux varie de -6,87 à +0,84 (Figure 7). Aucun indice nul n'a été enregistré sur l'ensemble des eaux étudiées. Les valeurs négatives correspondent à 91,8% des indices déterminés et les valeurs positives ne représentent que 8,2%. Les plus faibles valeurs de l'IEB sont obtenues pendant la grande saison de pluies.

La prédominance des valeurs négatives de l'IEB indique un échange de base lié aux minéraux argileux qui fixent le calcium présent dans les eaux de la nappe après libération du sodium.

DISCUSSION

Le krigeage géostatistique fournit dans l'ensemble, une bonne estimation de la conductivité électrique sur la zone étudiée. Toutefois, le manque de points de mesure au centre du site pourrait entraîner des écarts d'estimations élevés à cet endroit.

La caractérisation de la distribution spatiale des conductivités électriques a permis de différencier deux zones majeures de minéralisation des eaux au niveau du secteur sud du District d'Abidjan. Cette différenciation, en accord avec l'environnement côtier et la nature de l'aquifère (libre et de faible profondeur) est liée à la composition chimique des eaux. En effet, les pluies qui prennent naissance dans la zone d'étude se chargent en sels marins, en particulier, les ions chlorure, qui leur confèrent un faciès chloruré. La nappe dont l'alimentation se fait à partir des eaux de pluie comme l'ont montré Oga et al. (1998), acquiert précocement ce faciès en s'enrichissant en ions chlorure et sodium. Cette influence indirecte de la mer sur la minéralisation est plus marquée dans les eaux de puits de Treichville, Koumassi, Biétri (Marcory), Adjouffou (Port-Bouët) et Moossou (Grand-Bassam). Les corrélations positives significatives entre les ions sodium et chlorure d'une part, et la conductivité d'autre part, montre l'origine commune de ces deux ions et leur influence dans la minéralisation.

Par ailleurs, l'influence directe de la mer sur la minéralisation est marquée par

l'enrichissement des eaux, en contact avec les eaux salées, en ions chlorure. Ce phénomène affecte surtout les puits situés en bordure de mer et de lagunes. La forte corrélation observée entre les chlorures et la conductivité de ces puits confirme l'influence de l'intrusion d'eau salée sur la minéralisation des eaux du Quaternaire. Des auteurs comme Lee et Song (2007) ont aussi rapporté que les fortes teneurs de chlorure des eaux souterraines en bordure de mer sont liées à l'intrusion d'eau marine.

Les ions sodium proviendraient également, avec les ions potassium, des réactions d'échange de bases au niveau des argiles présentes dans les horizons sableux. Cela est mis en évidence par la prédominance des indices d'échanges négatifs des eaux. Mais, les eaux du Quaternaire, étant naturellement pauvres en calcium et magnésium du fait du milieu silicaté qui constitue l'aquifère, ces échanges auraient eu lieu suite à un apport superficiel d'ions calcium et magnésium dans les eaux de puits. Cet apport est plus marqué pendant la grande saison des pluies, période au cours de laquelle, les valeurs de l'IEB sont très faibles.

Les concentrations élevées de nitrate dans les eaux fortement minéralisées sont attribuées à une origine anthropique et proviennent de l'infiltration des eaux polluantes superficielles. En effet, de nombreux quartiers de la zone d'étude possèdent un système d'évacuation des effluents peu développé et inefficace. La population rejette directement les déchets liquides et solides dans les fosses d'aisance ou à même le sol. Ces résultats confirment ceux obtenus par Issiaka et al. (2006) et Ahoussi et al. (2008) dans les zones urbanisées du secteur sud du District d'Abidjan. Les travaux de Daskalaki et Voudouris (2007) sur les eaux souterraines, en Grèce, ont également montré l'influence de la pollution anthropique dans la minéralisation des eaux souterraines.

Conclusion

La modélisation spatiale des conductivités électriques a montré que la minéralisation des eaux du Quaternaire est distribuée suivant la loi sphérique. Le recours aux méthodes statistiques de l'algorithme de

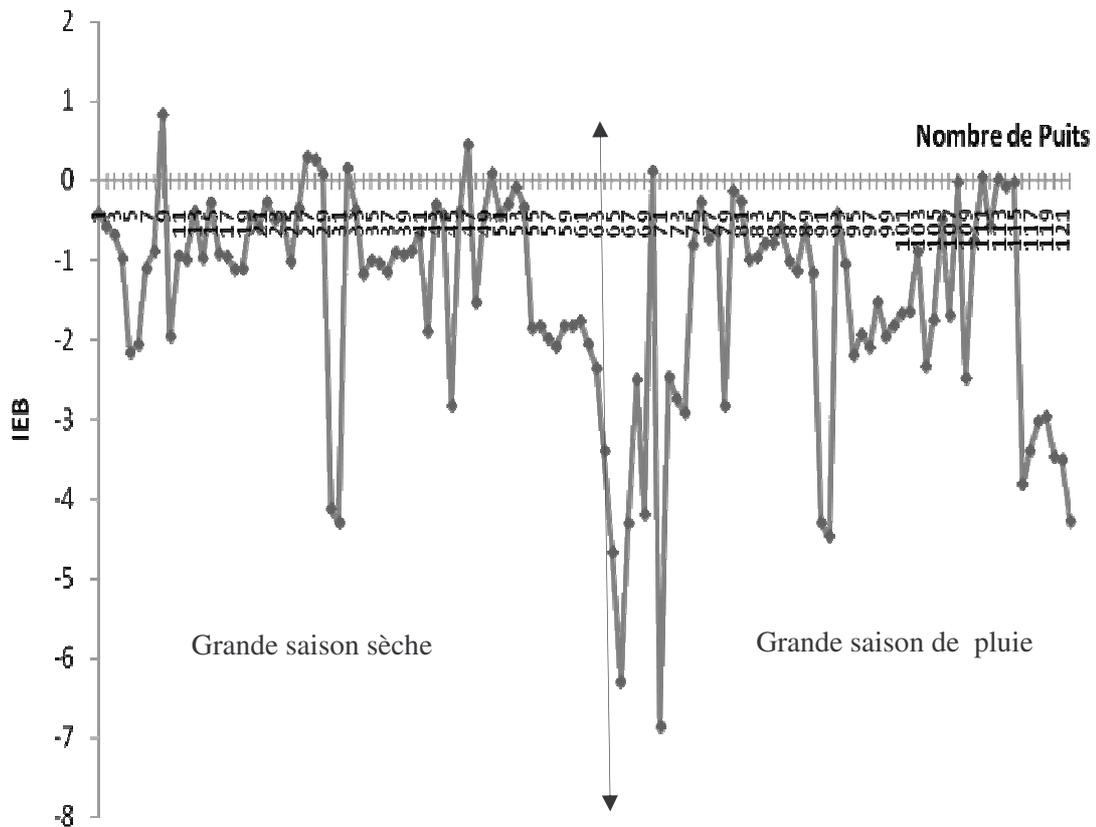


Figure 7: Variation de l'indice d'échange de base des eaux de la nappe du Quaternaire.

Kohonen, et hydrochimique de l'indice d'échange de base, a permis d'identifier quatre processus à l'origine de la minéralisation des eaux. Les échanges de bases et la dissolution des sels marins sont observés sur l'ensemble du site. En revanche, la pollution anthropique et l'intrusion d'eau marine et lagunaire affectent les eaux des zones urbanisées et celles en bordure des lagunes et de l'océan atlantique.

Bien que la salinisation des eaux souterraines paraisse être un phénomène irréversible, il est possible de limiter son aggravation et son extension géographique. Le contrôle des pompages intensifs dans la zone côtière, la protection des puits, et la

sensibilisation de la population constituent les actions à prendre pour réduire les risques de dégradation de la qualité de la nappe.

REMERCIEMENTS

Nous adressons nos sincères remerciements aux autorités municipales de Treichville, Marcory, Koumassi, Port-bouët, Grand-bassam et celles de l'Université d'Abobo-Adjamé pour leur assistance technique. Nous remercions également les chefs des villages de Maffiblé, Modeste, Moossou, Vitré I et Vitré II pour nous avoir permis d'effectuer les différentes campagnes d'échantillonnage des eaux dans leurs circonscriptions.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ahoussi KE, Soro N, Soro G, Lasm T, Oga M, Zade SP. 2008. Groundwater pollution in Africa biggest towns: case of the town of Abidjan (Côte d'Ivoire). *Eur. J. Sci. Res.*, **20**: 302-316.
- Assaf H, Saadeh M. 2008. Geostatistical Assessment of Groundwater Nitrate Contamination with Reflection on DRASTIC Vulnerability Assessment: The Case of the Upper Litani Basin, Lebanon. *Water Resour. Manage.*, DOI 10.1007/s11269-008-9299-8, in press,
- Bouziane MT, Labadi A. 2009. Les Eaux Profondes de la Région de Biskra (Algérie). *Eur. J. Sci. Res.*, **25**: 526-537.
- Delor C, Diaby I, Simeon Y, Yao B, Tastet JP, Vidal M, Chiron JP, Dommanget A. 1992. Notice explicative de la carte Géologique de la Côte d'Ivoire à 1/200000, Feuille Grand-Bassam, Mémoire de la Direction de la Géologie de Côte d'Ivoire, n°4, Abidjan, Côte d'Ivoire, p.30.
- Daessle WL, Sanchez EC, Camacho-Ibar VF, Mendoza-Espinosa LG, Carriquiry JD, Macias VA, Castro PG. 2005. Geochemical evolution of groundwater in the Maeadero coastal aquifer during a dry year in Baja California, Mexico. *Hydrogeol. J.*, **13**: 584- 595.
- D'Alessandro W, Bellomo S, Brusca L, Longo M. 2008. Survey on fluoride, bromide and chloride contents in public drinking water supplies in Sicily (Italy). *Environ. Monit. Assess.*, **145**: 303-313.
- Daskalaki P, Voudouris K. 2008. Groundwater quality of porous aquifers in Greece: a synoptic review. *Environ. Geol.*, **54**: 505-513.
- El Moujabber M, Bou-Samra B, Darwish T, Atallah T. 2006. Comparison of different indicators for groundwater by seawater intrusion on the lebanese coast. *Water Resour. Manage.*, **20**: 161-180.
- Issiaka S, Albert GBT, Aristide DG, Innocent KK. 2006. Vulnerability assessment of Abidjan Quaternary Aquifer using the DRASTIC method. In *Groundwater pollution in Africa*, Xu Y, USHER B (Eds). Taylor & Francis/Balkema: Leiden; 115-124.
- Konan KF, Leprieur F, Ouattara A, Brosse S, Grenouillet G, Gourène G, Winterton P, Lek S. 2006. Spatio-temporal patterns of fish assemblages in coastal West African rivers: a self-organizing map approach. *Aquat. Living Resour.*, **19**: 361-370.
- Lee JY, Song SH. 2007. Groundwater chemistry and ionic ratios in a western coastal aquifer of Buan, Korea: implication for seawater intrusion. *Geosciences J.*, **3**: 259 -270.
- Ligban R, Goné LD, Kamagaté B, Saley MB, Biémi J. 2009. Processus hydrogéochimiques et origine des sources naturelles dans le degré carré de Daloa (Centre ouest de la Côte d'Ivoire). *Int. J. Biol. Chem. Sci.*, **3**(1): 38-47.
- Matheron G. 1965. Les variables régionalisées et leur estimation: une application de la théorie des fonctions aléatoires aux sciences de la nature. Masson : Paris.
- Oga M, Marlin C, Dever L. 1998. Recharge des nappes du Continental Terminal et du Quaternaire dans la région du Grand Abidjan (Côte d'Ivoire). Conférence internationale ABIDAN'98. Variabilité des ressources en eau en Afrique au XX^{ème} siècle : 127-130.
- Park YS, Cereghino R., Compin A, Lek S. 2003. Applications of artificial neural networks for patterning and predicting aquatic insect species richness in running waters. *Ecol., Model.*, **160**: 265- 280.
- Peeters L, Bacão F, Lobo V, Dassargues A. 2006. Exploratory data analysis and clustering of multivariate spatial hydrogeological data by means of GEO3DSOM, a variant of Kohonen's Self-Organizing Map. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, **3**: 1487-1516.
- Shammas MI, Jacks G. 2007. Seawater intrusion in the Salalah plain aquifer, Oman. *Environ Geol.*, **53**: 575-587.
- Sánchez-Martos F, Aguilera PA, Garrido-Frenich A, Torres JA, Pulido-Bosch A. 2002. Assessment of Groundwater Quality by Means of Self-Organizing Maps: Application in a Semiarid Area. *Environ. Manage.*, **30**: 716-726.
- Sogréah. 1996. Etude de la gestion et de la protection de la nappe assurant la production en eau potable d'Abidjan.

- Etude sur modèle mathématique. Rapport final ; synthèse des résultats, volume 2, République de Côte d'Ivoire, Ministère des infrastructures économiques, Direction et Contrôles des Grands Travaux (DCGTx), 30 p.
- Soro N, Lasm T, Kouadio BH., Soro G, Ahoussi KE. 2004. Variabilité du régime pluviométrique du Sud de la Côte d'Ivoire et son impact sur l'alimentation de la nappe d'Abidjan. *Sud Sci. Tech.*, **12**: 30-40.
- Terzić J, Marković T, Pekaš Z. 2008. Influence of sea-water intrusion and agricultural production on the Blato Aquifer, Island of Korcula, Croatia. *Environ. Geol.*, **54**: 719-729.
- Trabelsi R, Zairi M, Smida H, Dhia BH. 2005. Salinisation des nappes côtières : cas de la nappe nord du Sahel de Sfax, Tunisie. *C. R. Geosciences*, **337**: 515-524.
- Xun Z, Haiyan Z, Li Z. 2008. Characteristics of Piezometric heads and determination of fresh water-salt water interface in the coastal zone near Beihai, China. *Environ. Geol.*, **54**: 67-73.