

JOURNAL OF ENVIRONMENTAL HYDROLOGY

The Electronic Journal of the International Association for Environmental Hydrology

On the World Wide Web at <http://www.hydroweb.com>

VOLUME 18

2010

CARACTÉRISATION HYDRODYNAMIQUE ET HYDROGÉOCHIMIQUE DES AQUIFÈRES FISSURÉS DE LA RÉGION DE TOUMODI (CENTRE DE LA CÔTE D'IVOIRE)

Kouakou Alphonse Yao¹

Amani Michel Kouassi¹

Yao Blaise Koffi²

Jean Biemi²

¹Département des Sciences de la Terre et des Ressources Minières,
Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny, Côte d'Ivoire

²Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des
Ressources Minières, Université de Cocody, Côte d'Ivoire

Le département de Toumodi (Centre de la Côte d'Ivoire) est localisé entre les latitudes 6°12 et 6°50 Nord et les longitudes 4°50 et 5°20 Ouest, avec une pluviométrie annuelle inférieure à 1 200 mm. Les formations géologiques rencontrées sont constituées de granitoïdes, de roches vertes, de roches volcano-sédimentaires et des schistes. La région de Toumodi renferme un système aquifère constitué d'un niveau altéritique et d'un niveau fissuré. L'hydrogéologie de la région est largement influencée par des activités tectoniques majeures qui ont eu pour conséquences une forte fracturation de la zone qui joue un rôle essentiel dans l'hydraulicité du système aquifère. Cette étude a pour objectif de caractériser le système aquifère de la région de Toumodi du point de vue hydrodynamique et hydrogéochimique. Les caractéristiques hydrodynamiques ont été calculées à partir des données des essais de pompage. L'hydrogéochimie de la zone a été étudiée au moyen des données d'analyse physico-chimique. A partir de ces différentes données, plusieurs méthodes ont été appliquées. La méthode de Cooper-Jacob a été utilisée pour la détermination de la transmissivité; L'Indice d'Echange de Base (IEB) a été utilisé pour l'étude de l'acquisition de la minéralisation. Le diagramme de Piper a permis la détermination des faciès chimiques des eaux. Le diagramme de Schoeller-Berkaloff a permis la détermination des formules hydrochimiques des faciès des eaux souterraines. Des investigations hydrodynamiques, il ressort que la transmissivité des aquifères de Toumodi varie de $1,34 \times 10^{-6}$ à $6,93 \times 10^{-4}$ m²/s avec une moyenne de $5,37 \times 10^{-5}$ m²/s. L'étude géochimique a montré que les eaux de Toumodi échangent plus leurs alcalino-terreux (Ca²⁺ et Mg²⁺) contre les alcalins (Na⁺ et K⁺) des permutolites. Les résultats des analyses physico-chimiques ont permis de définir la composition physico-chimique des eaux et leurs regroupements en familles. Les eaux souterraines de la région de Toumodi se regroupent en trois faciès qui sont le faciès bicarbonaté calcique (72,72%), le faciès bicarbonaté sodi-potassique (21,21%) et le faciès chloruré-calcique (6,06%).

JOURNAL OF ENVIRONMENTAL HYDROLOGY

The Electronic Journal of the International Association for Environmental Hydrology

On the World Wide Web at <http://www.hydroweb.com>

VOLUME 18

2010

HYDRODYNAMICAL AND HYDROGEOCHEMICAL CHARACTERIZATION OF THE FRACTURED AQUIFERS OF THE TOUMODI AREA (CENTRAL CÔTE D'IVOIRE)

Kouakou Alphonse Yao¹

Amani Michel Kouassi¹

Yao Blaise Koffi²

Jean Biemi²

¹Département des Sciences de la Terre et des Ressources Minières,
Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny, Côte d'Ivoire

²Unité de Formation et de Recherche des Sciences de la Terre et des
Ressources Minières, Université de Cocody, Côte d'Ivoire

The study was conducted in the Toumodi area (Central Côte d'Ivoire). It is located between the latitudes 6°12' W and 6°50' N and longitudes 4°50' and 5°20'. Annual rainfall is less than 1200 mm. The geological formations consist of granitoids, green stones, volcanic rocks and schists. The Toumodi area contains an aquifer system subdivided into a weathered and a fractured horizons. The hydrogeology of this system is largely influenced by major tectonic activities which resulted in a strong fracturing of the area. This plays a crucial role in the hydraulics of this aquifer system. The objective of this study is to characterize the aquifer system of the Toumodi area from the hydrodynamic and hydrogeochemical points of view. The hydrodynamic characteristics (transmissivity) were calculated by interpretation of pumping tests. The hydrogeochemical characterization was carried out by physical-chemical analysis. Based on these data, several methods were applied. The method of Cooper-Jacob was used to determine transmissivity, the Index of basic Exchange (IEB) was applied to the geochemical study, and the Piper and Schoeller-Berkaloff diagrams were used to determine the chemical facies of waters. From the hydrodynamic investigation, the transmissivity of the aquifers of Toumodi varies from 1.34×10^{-6} to 6.93×10^{-4} m²/s with an average of 5.37×10^{-5} m²/s. The geochemical study showed that water of the Toumodi are more alkaline-earth (Ca^{2+} and Mg^{2+}) than alkaline (Na^{+} and K^{+}) of the permutolites. The study shows that groundwaters from the Toumodi area are characterized by three facies which are the HCO_3 -Ca facies (72.72%), the HCO_3 -Na-K facies (21.21%) and the Cl-Ca facies (6.06%).

INTRODUCTION

Les eaux de consommation humaine proviennent généralement soit des eaux de surface, soit des eaux souterraines. Les eaux souterraines qui représentent 1,69%, occupent le deuxième rang des réserves mondiales en eau douce après les eaux contenues dans les glaciers et les calottes polaires (1,74%). Ces eaux souterraines devancent largement les eaux continentales de surface (0,0076%). Dans la région de Toumodi, l'eau souterraine constitue la principale source d'approvisionnement en eau potable des populations. L'alimentation en eau se fait généralement par des forages qui captent uniquement des aquifères discontinus plus profonds. Le défi à relever est donc de disposer d'eau souterraine en quantité suffisante et en qualité satisfaite au regard des normes de potabilité des eaux pour satisfaire les besoins des populations. La qualité de cette eau souterraine est tributaire de la lithologie des formations géologiques en place ainsi que des interactions entre l'eau et ces formations. Aussi, l'optimisation des résultats et des coûts des travaux de prospection hydrogéologique demeure-t-elle conditionnée par le degré de connaissance des paramètres hydrodynamiques des aquifères (Sinan et Razack, 2006). Ainsi, l'analyse hydrodynamique et hydrogéochimique des eaux constitue des éléments indispensables à l'étude des potentialités hydrogéologiques et à la gestion des ressources en eau. Elle permet d'apporter de nombreuses informations sur le milieu aquifère, la nature de l'encaissant, les zones d'alimentation et de circulation, la potabilité des eaux, etc. Cette étude a pour objectif de caractériser le système aquifère de la région de Toumodi du point de vue hydrodynamique et hydrochimique. Les paramètres hydrodynamiques des aquifères ont été déterminés à partir de la méthode de Cooper-Jacob avec les données d'essais de pompage. L'étude hydrogéochimique a été réalisée à partir de l'analyse des données d'analyse physico-chimique des points d'eau basée sur les indices d'échange de bases (IEB), les diagrammes de Piper et Schoeller-Berkaloff.

Le secteur d'étude est la région de Toumodi (Centre de la Côte d'Ivoire) qui est localisée entre les latitudes 6°12 et 6°50 Nord et les longitudes 4°50 et 5°20 Ouest sur une superficie d'environ 3 032 km² (Figure 1). Le climat de la région de Toumodi est de type tropical humide avec une alternance de saisons pluvieuses (2) et de saisons sèches (2). La hauteur pluviométrique moyenne annuelle est inférieure à 1200 mm. La végétation est constituée pour l'essentiel d'une savane arborée, des îlots forestiers par endroit et des galeries forestières le long des cours d'eau. Le paysage géomorphologique est caractérisé par des pédiplaines avec des versants quasi-rectilignes, des bas-fonds plats et en majorité par des chaînes de collines granitiques très aplaties et peu élevées. Les sommets des collines sont souvent pourvus d'épaisses cuirasses latéritiques anciennes. La région de Toumodi est drainée par le fleuve Bandama et ses affluents qui coulent du Nord vers le Sud. La rivière Kan, affluent du N'zi traverse la région du Nord-Ouest au Sud-Est. A cela s'ajoute la rivière Bomba dont les affluents développent un réseau de type parallèle, rectiligne, à l'écoulement SSW-NNE.

Du point de vue géologique, la région de Toumodi appartient au domaine Baoulé-Mossi du craton ouest africain. Les roches rencontrées dans cette région sont généralement constituées de granitoïdes, de roches vertes, de roches volcano-sédimentaires et des schistes (Yacé, 1976 et Daouda, 1998) (Figure 1). Parmi les granitoïdes, on distingue les granites et les granodiorites qui constituent le socle de la région de Toumodi. On les retrouve à Abokouamékro où elles se présentent en dômes massifs de direction N 65°. Ces dômes dans leur ensemble, présentent une linéation de direction N 10°. Les roches vertes sont constituées des metabasaltes, des pillow-lavas et des métagabbros qui sont peu altérés. Les roches métamorphiques sont constituées d'une

série de schistes noirs et de schistes calcareux-chloriteux. Les roches volcano-sédimentaires se composent des métabrèches à amphiboles et des métaconglomérats qui sont constitués de poudings et brèches consolidées par un ciment de nature sédimentaire. Les roches volcaniques sont constituées d'une part de roches volcaniques issues d'une coulée de lave (exemple : basaltes) et sont cristallisées en petits cristaux (microlithes), avec des fentes de retrait (refroidissement rapide) et des vacuoles. Ces formations ont une porosité et une perméabilité de fracture en plus des joints de stratification. D'autre part, on a les roches volcaniques issues d'une projection volcanique (exemple: tufs volcaniques) qui sont des roches meubles ou consolidées, souvent mal cristallisées (refroidissement très rapide, parties amorphes), stratifiées. Les roches sédimentaires ont une grande porosité et aussi une bonne perméabilité. Ce sont des roches meubles en accumulation instable facilement érodables (cendres volcaniques) et roches consolidées plus rigides (ignimbrites) pouvant servir de pierres de construction (Andes).

Le système aquifère de la région de Toumodi est conforme à celui rencontré généralement en milieu de socle en zone tropicale. En effet, dans les zones de socle des régions tropicales, plusieurs travaux (Faillat, 1986 ; Bernadi et al., 1988 et Guiraud, 1988 in N'go et al., 2005) ont mis en évidence deux principaux types de réservoirs : les réservoirs des altérites et les réservoirs fracturés. L'ensemble altérites/socle fracturé se comporte alors comme un unique système aquifère, de type bicouche (Margat, 1983 in N'go et al., 2005).

Les zones d'altération quand elles sont épaisses, peuvent contenir des circulations importantes d'eau exploitées parfois par des puits mais ces eaux sont souvent polluées (Oga et al., 2009). Dans les formations cristallines, la part d'eau infiltrée est liée aux aléas climatiques mais surtout à la présence d'éléments structuraux (fissures, fractures, etc.). Les formations géologiques de la région de Toumodi sont caractérisées par la présence de schistosité, de fractures, de larges filons de quartz, etc. (Daouda, 1998), ce qui favorise l'infiltration et partant la recharge des nappes souterraines.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Données utilisées

L'étude a été effectuée sur un réseau de 33 forages d'eau. Les fiches techniques de forages utilisées comprennent des analyses physico-chimiques et des résultats d'essais de puits des eaux souterraines de la région Toumodi. Les analyses physico-chimiques ont été effectuées en 2001. Ces analyses regroupent les résultats des paramètres physiques et des dosages de certains éléments chimiques. Ces informations ont été obtenues auprès de la Direction de l'Hydraulique Humaine (DHH). Les analyses physico-chimiques ont été réalisées par le laboratoire privé d'analyse d'Abengourou (Côte d'Ivoire). Les procédures de dosage ont été déduites des méthodes d'analyse standard.

Méthodes utilisées

L'évaluation des potentialités hydrogéologiques d'une région demeure conditionnée par le degré de connaissance des paramètres hydrodynamiques des aquifères. Dans cette étude, la caractérisation hydrodynamique des réservoirs a concerné l'évaluation de la transmissivité. Ce paramètre a été déduit directement des essais hydrauliques in situ (Kruseman et De Ridder, 1973 in Sinan et Razack, 2006). De plus, la transmissivité quantifie au mieux les possibilités aquifères des réservoirs (Sinan et Razack, 2006).

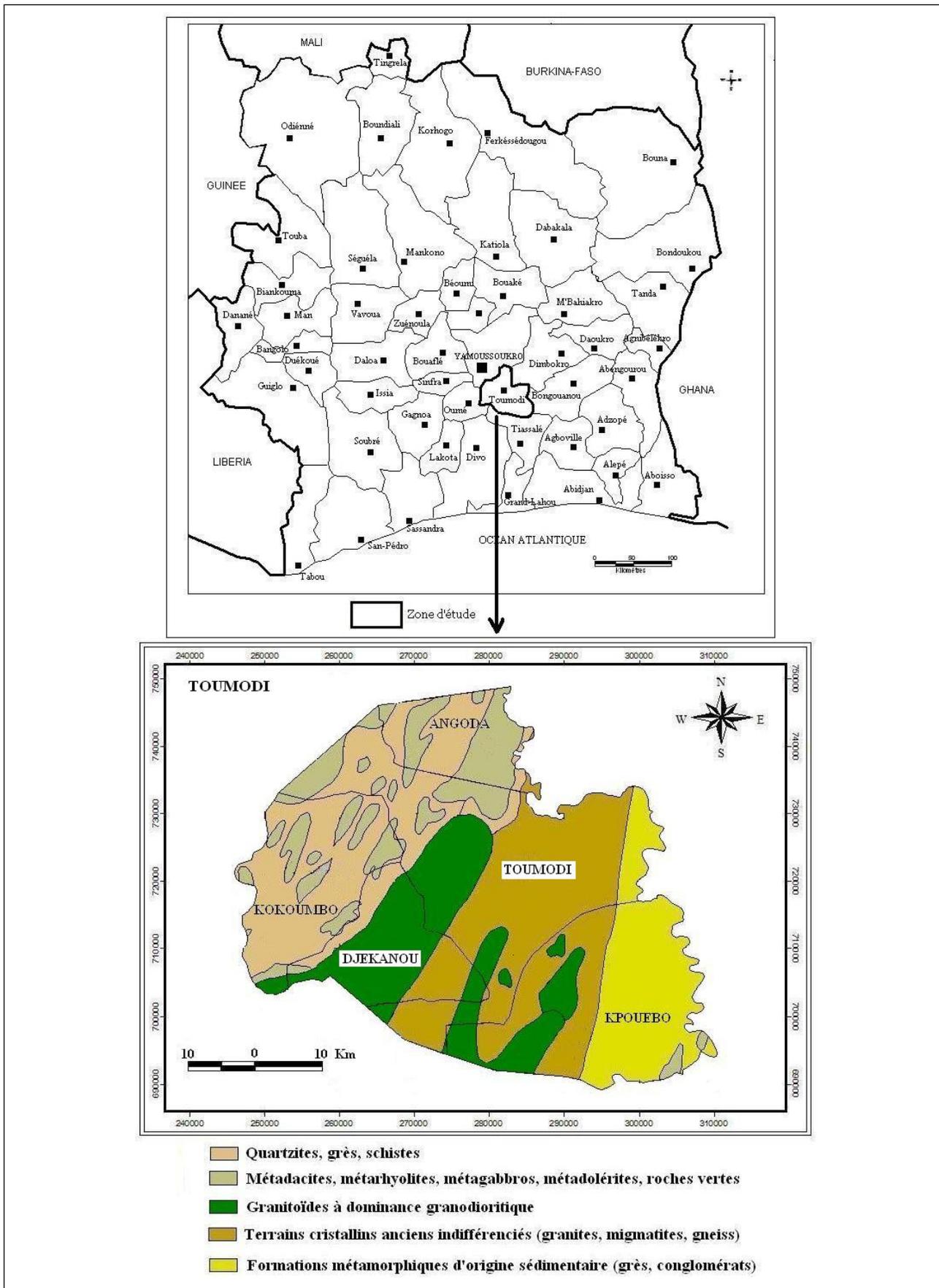


Figure 1. Situation géographique et géologie du département de Toumodi (Yacé, 1976 ; Daouda, 1998).

La détermination de la transmissivité a été réalisée par la méthode de Cooper-Jacob. Cette méthode d'interprétation des données d'essais de puits est basée sur l'approximation logarithmique de l'équation de Théis. La série infinie ou la fonction de puits $W(u)$ a été tronquée d'après le deuxième terme (équation 1):

$$W(u) = \gamma - \ln u = -\gamma - \ln\left(\frac{r^2 S}{4Tt}\right) \quad (1)$$

avec $u = \frac{r^2 S}{4Tt}$ et $\gamma = 0,577$ γ : est la constante de Euler

L'expression du rabattement à l'instant t est définie par l'équation 2 (équation de Cooper-Jacob en descente):

$$s(r, t) = \frac{0,183}{T} Q \log \frac{2,25Tt}{r^2 S} \quad (2)$$

avec :

- s : le rabattement exprimé en un temps t , exprimé en m ;
- T : la transmissivité exprimée en m^2/s ;
- S : le coefficient d'emménagement, sans dimension ;
- t : le temps écoulé depuis le début du pompage, exprimé en s ;
- r : distance du piézomètre à l'axe du puits, en m.
- Q : le débit de pompage en m^3/s .

Les hypothèses et les conditions d'application de cette méthode sont les suivantes :

- l'aquifère a une extension latérale infinie ;
- le diamètre du puits est négligeable ;
- le puits est parfait ;
- l'aquifère est homogène, isotrope, d'épaisseur constante sur toute la zone influencée par le pompage ;
- l'écoulement vers le puits est transitoire.

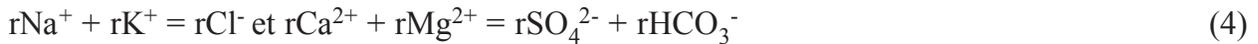
Cette méthode n'est applicable que si la valeur de u est inférieure à 0,01. Lorsque dans certains cas, les pompages d'essai réalisés ne vérifient jamais l'intégralité de ces conditions, cette situation n'empêche pas l'usage des méthodes pour l'interprétation de ces pompages. Ces méthodes donnent des résultats significatifs et représentatifs des aquifères quand les conditions réelles sont voisines des conditions théoriques.

Le suivi des niveaux a été effectué dans les forages où a lieu le pompage. De ce fait, seule la transmissivité peut être évaluée. Elle a été évaluée à partir des résultats en phase de descente, soit (équation 3):

$$T = 0,183 \frac{Q}{\Delta s} \quad (3)$$

Δs représente la pente ou module logarithmique.

Du point de vue hydrogéochimique des eaux, le mécanisme de minéralisation des eaux a été étudié à l'aide du calcul de l'indice d'échange de base (IEB). Les substances échangeuses d'ions sont appelées permutolites (Schoeller, 1962 in Ahoussi, 2008). Parmi ces permutolites, on distingue les minéraux argileux (kaolinite, halloysite, montmorillonite), les minéraux zéolithiques, les hydroxydes ferriques, les substances organiques (l'humus). L'IEB désigne le rapport entre ions échangés et ions de même nature primitivement existant dans la solution. Pour sa détermination, nous supposons qu'avant les échanges il y avait équilibre (équation 4) :



Cette relation d'équilibre permet de définir deux cas de figure :

- échange des alcalins (Na^+ , K^+) de l'eau contre les alcalino-terreux (Ca^{2+} , Mg^{2+}) des permutolites. Ce premier cas permet de définir un IEB positif (équation 5) :

$$IEB = \frac{rCl^- - (rNa^+ + rK^+)}{rCl^-} \quad (5)$$

- échange des alcalino-terreux de l'eau contre les alcalins des permutolites. Dans ce deuxième cas, IEB est négatif et s'écrit de la manière suivante (équation 6) :

$$IEB = \frac{rCl^- - (rNa^+ + rK^+)}{r(SO_4^{2-} + HCO_3^- + NO_3^-)} \quad (6)$$

Dans les cas où l'I.E.B est nulle, cela signifie qu'il ne s'est produit aucun échange entre l'eau et l'encaissant, soit à cause du temps de séjour trop court de l'eau dans l'aquifère, soit parce que l'eau et ou les permutolites ont saturé leur capacité d'échange de base.

La classification hydrogéochimique des eaux souterraine a été réalisée à l'aide du diagramme logarithmique de Piper. Les résultats des analyses chimiques ont été projetés dans le diagramme de Piper qui est très fréquemment utilisé dans le domaine de l'hydrochimie avec de très bons résultats (Dadi et al., 1997 ; Rkiouak et al., 1997 ; Yermani et al., 2003 ; Mohammad et Hamed, 2004 ; Tabouche et Achour, 2004 ; Alayat et Lamouroux, 2007 ; Kouzana et al., 2007 ; Oga et al., 2009). Ce diagramme permet une représentation des anions et des cations sur deux triangles spécifiques dont les côtés témoignent des teneurs relatives en chacun des ions majeurs par rapport au total de ces ions (cations pour le triangle de gauche, anions pour le triangle de droite). La position relative d'un résultat analytique sur chacun de ces deux triangles permet de préciser en premier lieu la dominance anionique et cationique. A ces deux triangles, est associé un losange subdivisé en quatre losanges matérialisant un type d'eau, sur lequel est reportée l'intersection des deux lignes issues des points identifiés sur chaque triangle. Ce point d'intersection représente l'analyse globale de l'échantillon, sa position relative permet de préciser le faciès de l'eau.

La détermination des formules hydrochimiques des faciès des eaux souterraines a été faite au moyen du diagramme de Schoeller-Berkaloff. Ce diagramme est une représentation graphique semi-logarithmique (Trabelsi et al., 2007). Sur l'axe des abscisses sont représentés les différents ions majeurs. Pour chacun de ces ions (ou des groupements $Na^+ + K^+$ et $CO_3^{2-} + HCO_3^-$) la teneur réelle en mg/l est reportée sur l'axe des ordonnées. Les points obtenus sont reliés par des droites. L'allure du graphique obtenu permet de visualiser le faciès de l'eau et facilite sa comparaison.

L'utilisation des diagrammes de Piper et de Schoeller-Berkaloff a été facilitée par leur automatisation (Logiciel DIAGRAMMES 2.0).

Tableau 1. Classe de transmissivité dans les formations de la région de Toumodi.

Classes de T en m ² /s	Observation	Effectifs	% de classes	Moyenne
$T < 10^{-5}$	Faible	12	31,58	$5,39.10^{-6}$
$10^{-5} < T < 10^{-4}$	Moyenne	22	57,89	$4,06.10^{-5}$
$T > 10^{-4}$	Forte	4	10,53	$2,72.10^{-4}$

RÉSULTATSETINTERPRÉTATIONS

Hydrodynamisme des eaux souterraines de la région de Toumodi

Les valeurs de transmissivité obtenues dans la région ont été subdivisées en trois classes et sont consignées dans le tableau 1. Ces valeurs oscillent entre $1,34.10^{-6}$ et $6,93.10^{-4}$ m²/s avec une moyenne de $5,37.10^{-5}$ m²/s.

L'analyse du tableau 1 révèle que les différentes classes de transmissivités faibles, moyennes et fortes regroupent respectivement les pourcentages de 31,58%, 57,89% et 10,53%. Les forages ayant une transmissivité supérieure à 10^{-5} m²/s représentent 68,42% de l'ensemble des ouvrages étudiés. La classe de transmissivité prédominante est la classe de transmissivité moyenne. Les différentes valeurs de transmissivité obtenues ne peuvent être considérées comme valeur moyenne représentative de tout le système aquifère mais elles peuvent être indicatives compte tenu de l'hétérogénéité des formations du système aquifère.

Analyse hydrogéochimique

La température des eaux varie entre 25,3°C (Wafoussou) et 28,8°C (Alluminankro) avec une moyenne de 26,95°C et un écart-type de 0,83°C. Elle n'excède pas 30°C, valeur tolérée pour une eau destinée à la consommation humaine selon les normes O.M.S. La conductivité électrique des eaux souterraines varie entre 88 (Konan Bouikro) et 1715 iS/cm (Galégoua), avec une valeur moyenne de 593,53 iS/cm. Ces valeurs indiquent une minéralisation moyenne car elles sont toutes globalement inférieures à 1000 iS/cm et dépassent très rarement les normes O.M.S. (soit 1500mg/l). En effet, la minéralisation correspond à la totalité des sels dissous contenus dans l'eau. Le pH des eaux varie entre 5,86 (Grèbèkro) et 7,98 unités pH (Alluminankro), avec une moyenne de 7,05 et un écart-type de 0,34, ce qui est proche de la neutralité. Le pH des eaux souterraines répond donc aux normes de potabilité des eaux de consommation humaine.

La turbidité des eaux souterraines reste faible. Elle varie entre 0,19 NTU (N'Doukahakro) et 1,43 NTU (Djèboukro), avec une valeur moyenne de 0,65 NTU et un écart-type de 0,26 NTU. Ces valeurs montrent que les eaux de la région ne sont pas chargées en éléments dissous.

Du point de vue chimique, les eaux de la région de Toumodi sont caractérisées par une prédominance des ions bicarbonates sur les ions chlorures (Tableau 2). Les sulfates et les nitrates sont pratiquement absents dans ces eaux. Le calcium constitue le cation le plus important, puis viennent la somme (Na⁺ + K⁺) et le magnésium.

Les ions Fe²⁺ et Mn²⁺ sont présents dans quelques eaux de la région avec des concentrations qui varient respectivement de 0 mg/L à 0,5 mg/L et de 0 mg/L à 1 mg/L. Dans l'ensemble, 6,06 % des forages échantillonnés pour le fer et 21,21 % pour le manganèse, présentent des concentrations

Tableau 2. Paramètres chimiques des eaux souterraines de la région de Toumodi.

Paramètres	Moyenne	Maximum	Minimum
Ca ²⁺ (mg/l)	58,02	177,95	8,016
Mg ²⁺ (mg/l)	21,3	95,26	1,94
Na ⁺ + K ⁺ (mg/l)	41,81	274,8	0
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	260,58	585,6	36,6
Cl ⁻ (mg/l)	47,2	708,49	5,32
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	6,14	16	2
NO ₃ ⁻ (mg/l)	1,75	9,2	0,2

Tableau 3. Localités ayant des teneurs en fer et manganèse supérieures à la norme OMS.

Localités	Abokro	Koffi-Dièkro	Assakra	Abolékro	Zebouakro	Alluminakro	Djéboukro
Teneur en Fe ²⁺ (mg/l)	0,45	0,50	0,28	0,30	0,29	0,16	0,18
Teneur en Mn ²⁺ (mg/l)	0,10	0,25	1,00	0,10	0,10	0,10	0,35

supérieures à la norme l'OMS qui est respectivement de 0,30 mg/L et de 0,05 mg/L (Tableau 3). Les eaux critiques sont celles qui présentent à la fois des teneurs élevées en fer et en manganèse. Il s'agit des eaux d'Abokro (0,45 mg/l) et de Koffi Dièkro (0,50 mg/l).

Les différents faciès chimiques des eaux souterraines de Toumodi sont représentés sur la figure 2.

La représentation des résultats d'analyses chimiques dans le diagramme de Piper a permis d'identifier trois familles d'eau qui sont les eaux bicarbonatées calciques, les eaux bicarbonatées sodi-potassiques et les eaux chlorurées calciques (Figure 2). Les eaux bicarbonatées calciques représentent 72,72 % de l'ensemble des eaux souterraines de la région. Ensuite viennent les eaux bicarbonatées sodi-potassiques (21,21 %). Les eaux chlorurées calciques sont les moins représentées (6,06%).

La projection des différents points dans le diagramme de Schoeller-Berkaloff a permis de déterminer les différentes formules hydrochimiques liées aux différents hydrofaciès mis en évidence par le diagramme de Piper (Tableau 4).

La représentation des eaux de la région de Toumodi dans le diagramme de Piper selon la nature des roches (granitoïdes et schistes) (Figure 3) montre que le faciès chloruré calcique qui est minoritaire est constitué que des eaux des terrains granitiques. Les eaux des terrains granitiques dominent également le faciès bicarbonaté sodi-potassique avec 71,43 % des eaux de ce faciès. Les eaux des terrains schisteux ne représentent que 28,57%. Dans le faciès bicarbonaté calcique, les eaux des terrains schisteux sont les plus abondantes avec 58,33 % ; celles des terrains granitiques représentent 41,67%.

Les résultats du calcul des indices d'échange de base des eaux de la région sont consignés dans le tableau 5. Les valeurs d'indice d'échange de base (IEB) montrent que 54,55% des eaux de la région de Toumodi présentent un indice négatif et 45,45% de ces eaux présentent un indice positif

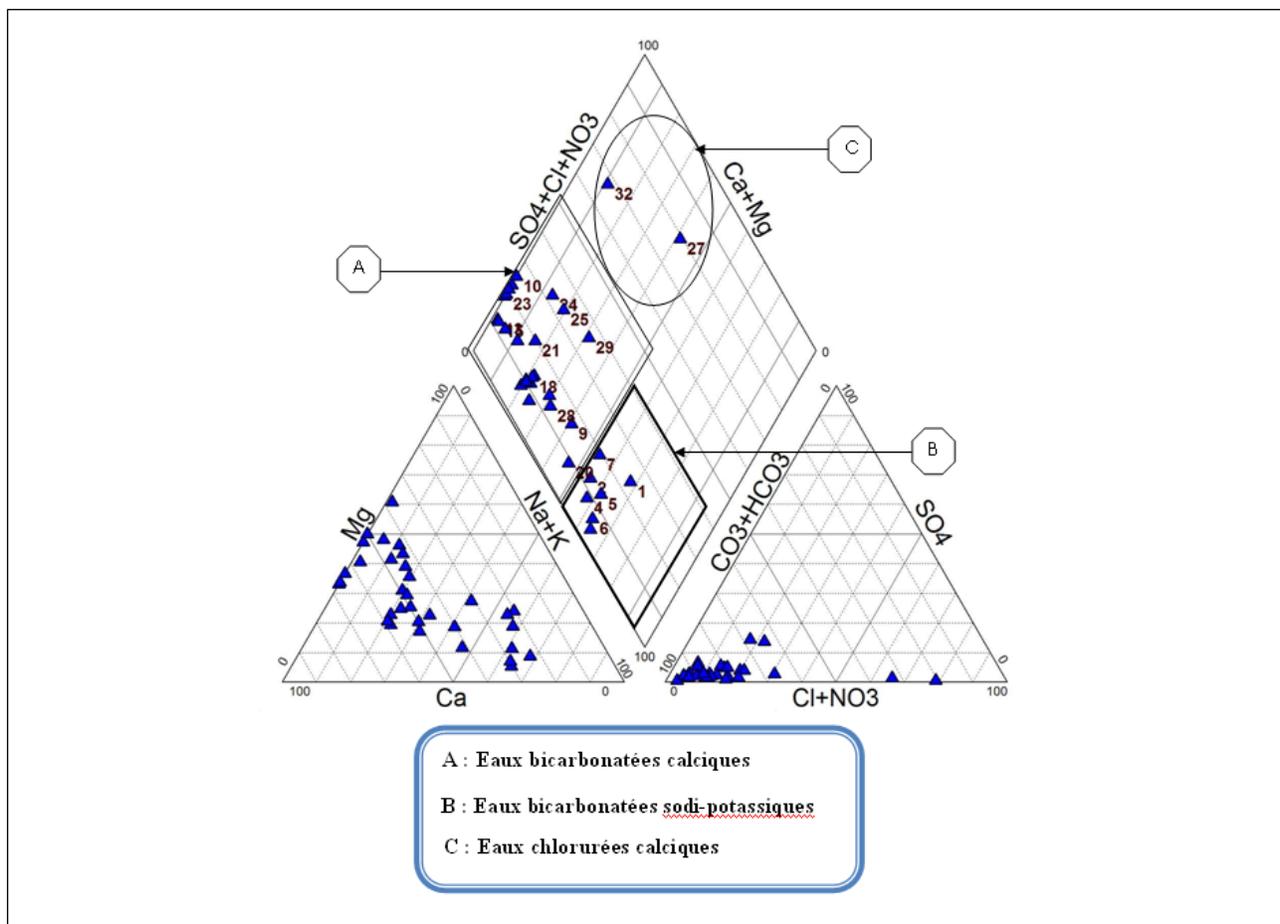


Figure 2. Classification hydrochimique des eaux souterraines de la région de Toumodi.

Tableau 4. Classification des hydrofaciès des eaux souterraines de la région de Toumodi.

Formules	Hydrofaciès	Echantillons	Pourcentage
$rHCO_3^- > rCl^- > rSO_4^{2-}$ $rCa^{2+} > r(Na^+ + K^+) > rMg^{2+}$ ou $rHCO_3^- > rCl^- > rSO_4^{2-}$ $rCa^{2+} > rMg^{2+} > r(Na^+ + K^+)$	Eaux bicarbonatées calciques	8 ; 9 ; 10 ; 11 ; 12 ; 13 ; 14 ; 15 ; 16 ; 17 ; 18 ; 19 ; 20 ; 21 ; 22 ; 23 ; 24 ; 25 ; 26 ; 28 ; 29 ; 30 ; 31 ; 33	72,72%
$rHCO_3^- > rCl^- > rSO_4^{2-}$ et $r(Na^+ + K^+) > rCa^{2+} > rMg^{2+}$ ou $rHCO_3^- > rCl^- > rSO_4^{2-}$ et $r(Na^+ + K^+) > rMg^{2+} > rCa^{2+}$	Eaux bicarbonatées sodi-potassiques	1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; 6 ; 7	21,21%
$rCl^- > rHCO_3^- > rSO_4^{2-}$ $rCa^{2+} > rMg^{2+} > r(Na^+ + K^+)$	Eaux chlorurées calciques	27 ; 32	6,06%

(Tableau 5). Ces eaux échangent leurs alcalino-terreux (Ca^+ et Mg^+) contre les alcalins (Na^+ et K^+) des permutolites. Les échanges des alcalins des eaux contre alcalino-terreux des permutolites représentent 45,45%.

DISCUSSION

Les conditions d'application de la méthode de Cooper-Jacob sont difficilement atteintes dans le cas d'un aquifère de fractures. Cette méthode nécessite également dans son application des pompages d'essais de longue durée d'au moins 24 heures et d'un piézomètre d'observation. Dans

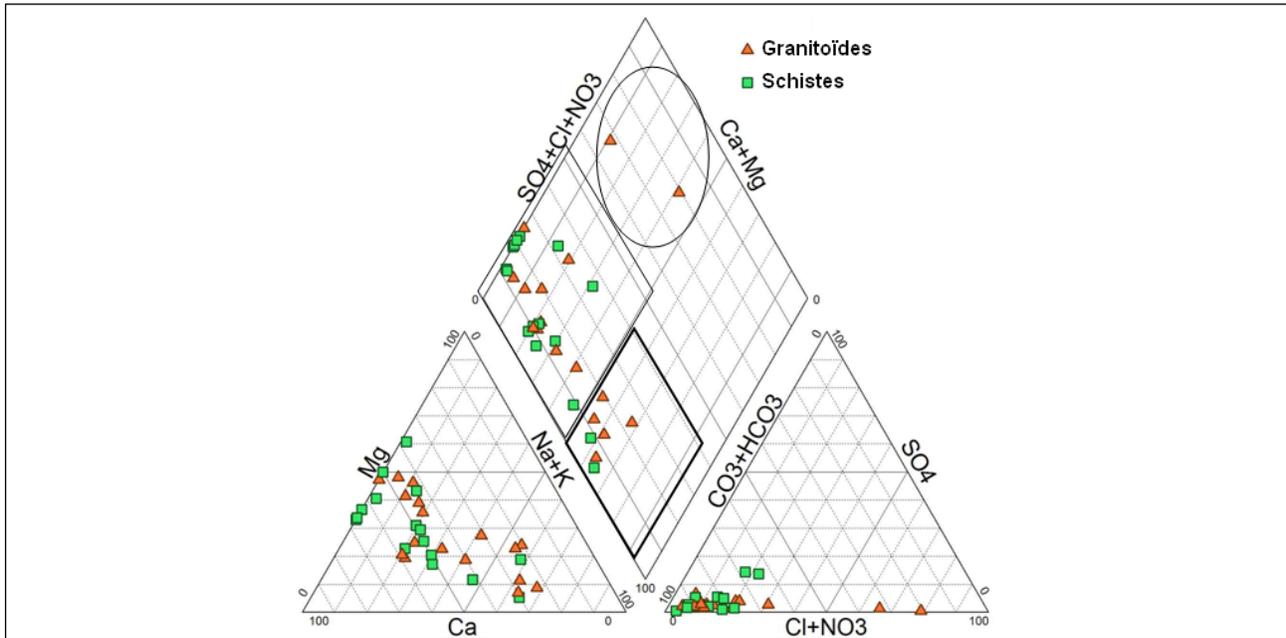


Figure 3. Représentation des eaux souterraines de Toumodi selon la nature géologique de la roche encaissante dans le diagramme de Piper.

Tableau 5. Valeurs des indices d'échange de bases des eaux souterraines de la région de Toumodi.

N°	Localités	Ouvrages	IEB	N°	Localités	Ouvrages	IEB
1	Zébouakro	Forage	-0,52	18	Tafissou	Forage	0,032
2	Akrékro	Forage	-0,422	19	Wafoussou	Forage	-0,075
3	Zahakro	Forage	-0,56	20	Kétékré Bonikro	Forage	-0,073
4	Abolékro	Forage	-0,48	21	Wakawakassou	Forage	-0,5
5	N'da Dibikro	Forage	-0,094	22	Yao N'drikro	Forage	0,022
6	N'gouanAmoinkro	Forage	-0,237	23	N'zi yobouékro	Forage	-0,089
7	KouadioBouikro	Forage	0,265	24	Kassékro	Forage	0,15
8	MaçonKonankro	Forage	0,1555	25	Assakro	Forage	1,58
9	Abokro	Forage	-0,058	26	Totonoukoffikro	Forage	0,16
10	MankanKouamékro	Forage	0,11	27	Koffi Diékro	Forage	-0,14
11	Djèboukro	Forage	0,205	28	Galégoua	Forage	1,99
12	Djèkro	Forage	-0,513	29	Ponoukro	Forage	0,057
13	Alluminakro	Forage	-0,54	30	Nengré koffikro	Forage	-0,169
14	Afoumoukankro	Forage	-0,398	31	Bofrebo	Forage	0,178
15	Djèkouamékro	Forage	0,047	32	Konan Bouikro	Forage	-0,028
16	N'doukahakro	Forage	-0,07	33	Assakra	Forage	1,578
17	Djèkro	Forage	-0,145				

cette étude, nous ne disposons que des pompages de courte durée. Le temps de pompage varie entre 5 et 17 heures et les mesures ont été réalisées directement dans le forage. Les résultats obtenus par l'application de cette méthode donnent un aperçu sur les paramètres hydrodynamiques des aquifères de la région de Toumodi. Les différentes valeurs de transmissivité obtenues varient entre $1,34 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ et $6,93 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$. Ces valeurs s'inscrivent dans l'ordre de grandeur obtenu par certains auteurs sur le territoire ivoirien. Les résultats des travaux de Ahoussi (2008) donnent des valeurs qui oscillent entre $1,6 \cdot 10^{-6}$ et $1,11 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ sur le socle dans la région d'Agboville. Les valeurs de transmissivités obtenues dans l'ancienne boucle du cacao varient entre $6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ et $6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ (Haubert, 1977 in Ahoussi, 2008). N'go et al. (2005) ont obtenu des valeurs moyennes de $2,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ dans les schistes et $2,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ dans les granites à Agboville. Les valeurs de la transmissivité obtenues dans la région de Toumodi évoluent dans le même ordre de grandeur que ceux obtenus par Lasm (2000) dans l'Ouest montagneux de la Côte d'Ivoire. Les travaux de Koffi (2003) réalisés dans le domaine cristallin ivoirien (Biankouma-Man) et dans le domaine sédimentaire (Dabou) pendant la descente (méthode de Théis et méthode de Jacob) et la remontée (méthode de Théis), ont mis en évidence différentes valeurs à l'intérieur d'un même domaine selon la méthode et la phase de détermination (descente ou remontée). En effet, dans le secteur Biankouma-Man, la transmissivité moyenne est de $5,62 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ avec la méthode de Théis et $1,60 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ avec la méthode de Jacob pendant la descente. Elle est de $1,82 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ pendant la remontée (méthode de Théis). Dans la région de Dabou, la transmissivité moyenne est de $4,34 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ avec la méthode de Théis et $4,81 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ avec la méthode de Jacob pendant la descente. Elle est de $1,37 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ pendant la remontée (méthode de Théis). La valeur moyenne calculée dans la région de Toumodi est de $5,38 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Cette valeur se situe également dans l'ordre de grandeur des valeurs de Koffi (2003) sur le socle. Les transmissivités obtenues dans la région de Toumodi sont hétérogènes (écart-type égal à $1,45 \cdot 10^{-4}$). Cette hétérogénéité des valeurs des transmissivités a été également constatée par Soro (2002) avec une variation de $5,97 \cdot 10^{-6}$ à $7,45 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ pour le socle granitique et $1,83 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ à $2,69 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ sur les métasédiments et métavolcanites. La dispersion des valeurs de transmissivité est conforme aux résultats déjà obtenus dans les formations analogues, aussi bien en Côte d'Ivoire qu'en Afrique de l'Ouest par beaucoup d'autres auteurs tels que Savadogo (1984), Traoré (1985), Biémi (1992), Tapsoba (1995), Savané (1997), Lasm (2000) (Ahoussi, 2008). La grande dispersion des valeurs des différents paramètres hydrodynamiques proviendrait de l'importante hétérogénéité de faciès lithologiques rencontrés au niveau du système aquifère et des variations quantitatives et qualitatives de la fracturation (Bahir et al., 2008).

La faible minéralisation des eaux souterraines de Toumodi serait liée au facteur structural (Dadi et al., 1997). Comme la région de Toumodi est formée d'un complexe de roches (cristallines, cristallophylliennes, volcano-sédimentaires, etc.), selon Dadi et al. (1997), la circulation des eaux souterraines se fait le long des zones de circulation privilégiées (qui sont essentiellement les fissures), plus encore suivant des directions privilégiées et rarement d'une manière active dans toute la masse du terrain «aquifère». Ces directions permettent une individualisation des filets liquides, s'opposent à leur mélange et empêchent donc la masse liquide d'avoir une composition chimique homogène. Cela réduit l'effet de la concentration par dissolution sur la composition chimique des eaux souterraines. La prédominance des ions bicarbonates (HCO_3^-) et chlorures (Cl^-) dans les eaux de Toumodi est une caractéristique des eaux souterraines des régions de socle de Côte d'Ivoire et d'Afrique (Oga et al., 2009). Les cations dominants qui s'associent à ces ions sont le Ca^{2+} et Mg^{2+} . Ces cations pourraient provenir des roches volcaniques basiques, plus ou

moins métamorphisées. Les faibles teneurs en calcium et magnésium plaident aussi en faveur d'une absence de pollution par les eaux de surface ou de subsurface (Alayat et Lamouroux, 2007 ; Ahoussi et al., 2008). Des résultats similaires ont été obtenus sur les eaux souterraines dans d'autres régions de la Côte d'Ivoire (Biémi, 1992 ; Savané, 1997 ; Oga, 1998 ; Soro, 2002 in Oga et al., 2009). Les faibles teneurs en nitrates des eaux sont dues à une absence de pollution d'origine anthropique de ces eaux. En effet, une augmentation de la contamination de l'eau souterraine par les nitrates est liée à l'intensification des fertilisations (engrais chimiques) (Namira et al., 2007). Les faibles teneurs en sulfates des eaux constituent une caractéristique des eaux souterraines de l'Afrique de l'Ouest en général et de la Côte d'Ivoire en particulier. Les fortes teneurs en fer et en manganèse enregistrées dans certaines localités constituent un important souci. En effet, ces deux éléments confèrent à l'eau un goût désagréable, un aspect et une couleur (rouge brun et marron noir respectivement pour le fer et pour le manganèse) qui amènent les populations rurales à se tourner vers d'autres sources d'approvisionnement dont les qualités bactériologiques et parasitologiques sont douteuses. Ce qui peut avoir des conséquences graves sur la santé des populations. Par ailleurs, une telle eau provoque des tâches sur la lingerie. Selon la concentration, il peut se produire des précipitations sur les parois des canalisations diminuant considérablement leur diamètre utile, provoquant un colmatage au niveau de ces canalisations. Un développement de bactéries ferrugineuses est observé augmentant ainsi la corrosion dans les forages, les rendant vulnérables à d'autres sources de pollution qui dégraderaient considérablement la qualité de ces eaux. Les eaux du socle diffèrent des eaux souterraines du bassin sédimentaire de Côte d'Ivoire qui présentent majoritairement un faciès chloruré sodi-potassique (Oga et al., 2009).

CONCLUSION

Les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères de la région de Toumodi sont très variables d'un point à un autre. En effet, les transmissivités de ces aquifères de la région varient entre $1,34.10^{-6}$ m²/s et $6,93.10^{-4}$ m²/s. Les eaux souterraines de la région de Toumodi ont une température moyenne de 26,95°C. Celle-ci est voisine de la température ambiante estimée à 26°C. Ces eaux sont moyennement minéralisées, avec une conductivité qui varie entre 88 et 1715 iS/cm pour une moyenne de 577,92 iS/cm. Le pH des eaux souterraines de la région de Toumodi varie entre 5,86 et 7,98 unités pH, avec une moyenne de 7,05 voisine de la neutralité. La turbidité mesurée varie entre 0,19 NTU et 1,43 NTU, avec une valeur moyenne de 0,65 NTU. Cette étude a également montré que les eaux souterraines de la région de Toumodi se regroupent en trois principaux hydrofaciès qui sont les eaux bicarbonatées calciques (72,70%), les eaux bicarbonatées sodi-potassique (21,20%) et les eaux chlorurées calciques (6,10%).

REMERCIEMENTS

Les auteurs de cet article remercient la Direction de l'Hydraulique Humaine (DHH) de Côte d'Ivoire pour la mise à disposition des données d'essais de pompage et d'analyses des paramètres physico-chimiques des eaux de la région de Toumodi et aux référés, Dr. Kouassi Ernest Ahoussi et Dr. Gbombélé Soro, tous deux à l'Université de Cocody-Abidjan (Côte d'Ivoire), qui ont participé à l'amélioration de cet article.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Ahoussi, K. E. 2008. Evaluation quantitative et qualitative des ressources en eau dans le Sud de la Côte d'Ivoire. Application de l'hydrochimie et des isotopes de l'environnement à l'étude des aquifères continus et discontinus de la région d'Abidjan-Agboville. Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 270p.

- Ahoussi, K. E., N. Soro, G. Soro, T. Lasm, M. S. Oga, et Zadé, S. 2008. Groundwater Pollution in Africans Biggest Towns: Case of the Town of Abidjan (Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, Vol. 20(2), pp.302-316.
- Alayat, H. et C. Lamouroux. 2007. Caractérisation physico-chimique des eaux thermo-minérales des monts de la Cheffia (extrême Nord-Est algérien). *La Presse thermale et climatique*, Vol.144, pp. 191-199.
- Bahir, M., P. Carreira, M. Oliveira Da Silva, et P. Fernandes. 2008. Caractérisation hydrodynamique, hydrochimique et isotopique du système aquifère de Kourimat (Bassin d'Essaouira, Maroc). *Estudios Geológicos*, Vol. 64 (1), pp. 61-73.
- Daouda, Y. B. 1998. Lithostratigraphie et pétrographie des formations birimiennes de Toumodi-Fêtékro (Côte d'Ivoire). Implication pour l'évolution crustale du paléoprotérozoïque du craton ouest-africain. Thèse de Doctorat de l'Université d'Orléans, France, 190p.
- Dadi, S., M. Boutaleb, F. Laziri, L. Demassieux, et A. Dassargues. 1997. Etude hydrochimique d'un aquifère en milieu fissuré: cas du Massif cristallophyllien d'Oulmès (Maroc). *Hard Rock Hydrosystems (Proceedings of Rabat Symposium S2, May 1997)*, IAHS Publication, Vol. 241, pp. 13-20.
- Koffi, Y. B. 2003. Contribution à l'analyse des méthodes d'interprétation des essais de pompage : cas des méthodes dérivées de la solution de Théis (méthodes grapho-analytique et méthodes numériques) : Application aux secteurs Biankouma-Man et Dabou. DEA de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 53p.
- Kouzana, L., A. Ben Mammou, N. et Gaaloul. 2007. Intrusion marine et salinisation des eaux d'une nappe phréatique côtière (Korba, Cap-Bon, Tunisie). *Geo-Eco-Trop*, Vol. 31, pp. 57-70.
- Lasm, T. 2000. Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle: analyses statistique et géostatistique de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes de Côte d'Ivoire (domaine archéen). Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, France, 274p.
- Levallois, P. 2006. Eau potable et santé publique : défis actuels et futurs. *Revue des Sciences de l'Eau*, Vol. 19 (2), pp. 127-135.
- Mohammad, R. A. A. et A. E. N. Hamed. 2004. Hydrochemical facies of groundwater in the Gaza Strip, Palestine. *Journal des Sciences Hydrologiques*, Vol. 49 (3), pp. 359-371.
- Namira, E. A., M. Larocque, O. Banton, et J. Benavente. 2007. Simulation de la contamination des eaux souterraines du delta du rio Adra et des albuferas (Almería, Espagne). *Revue des Sciences de l'Eau*, Vol. 20 (1), pp. 15-25.
- N'go, Y. A., D. L. Goné, I. Savané, et M. M. Goblé. 2005. Potentialités en eaux souterraines des aquifères fissurés de la région d'Agboville (Sud Ouest de la Côte d'Ivoire): Caractérisation hydroclimatique et physique. *Afrique SCIENCE*, Vol. 1 (1), pp. 127-144.
- Oga, M.S., T. Lasm, T., K. Yao, N. Soro, M. B. Saley, D. Kouassi, et F. Gnamba. 2009. Caractérisation chimique des eaux des aquifères de Fracture: cas de la région de Tiassalé en Cote D'ivoire. *European Journal of Scientific Research*, Vol. 31 (1), pp. 72-87.
- Rkiouak, S., A. Pulido-Bosch, et A. Gaiz. 1997. Potentialités hydrogéologiques d'une plaine littorale marocaine (Oued Laou, Tétouan-Chefchaouen). *Journal des Sciences Hydrologiques*, Vol. 42 (1), pp. 101-117.
- Sinan, M. et M. Razack. 2006. Estimation du champ de transmissivité d'un aquifère alluvial fortement hétérogène la résistance transversale. Application à la nappe du Haouz de Marrakech (Maroc). *Revue des Sciences de l'Eau*, Vol. 19 (3), pp. 221-232.
- Soro, N. 2002. Hydrochimie et géochimie isotopique des eaux souterraines du degré carré de Grand-Lahou et ses environs (sud-ouest de la Côte d'Ivoire). Implication hydrologique et hydrogéologique. Thèse de Doctorat ès sciences naturelles, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 272p.
- Soro, N. et A. B. T. Goula. 1997. Hydrochimie et isotopes de l'environnement appliqués à l'étude des eaux souterraines du Sud de la Côte d'Ivoire. *Proceedings of the Rabat Symposium, April 1997*, IAHS Publication, Vol. 244, pp. 105-113.
- Tabouche, N. et S. Achour. 2004. Etude de la qualité des eaux souterraines de la région orientale du Sahara septentrional algérien. *Larhyss Journal*, Vol. 3, pp. 99-113.

- Trabelsi, S., S. Bouri, et H. Ben Dhia. 2007. Contribution des approches hydrochimiques et géothermométriques à l'étude des eaux thermales de la province fluorée tunisienne (Nord-Est Tunisien). *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 7, pp. 85-88.
- Yacé, I. 1976. Le volcanisme éburnéen dans les parties centrale et méridionale de la chaîne précambrienne de FETTEKRO en Côte d'Ivoire. Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelles, Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, 373p.
- Yermani, M., K. Zouari, J. L. Michelot, A. Mamou, et L. Moumni. 2003. Approche géochimique du fonctionnement de la nappe profonde de Gafsa Nord (Tunisie centrale). *Journal des Sciences Hydrologiques*, Vol. 48 (1), pp. 95-108.

ADDRESS FOR CORRESPONDENCE

Amani Michel Kouassi
Institut National Polytechnique Félix Houphouët Boigny (INP HB)
Département des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STeRMi)
BP 1093 Yamoussoukro
Côte d'Ivoire

Email: michel.a_kouassi@yahoo.fr
