

CARACTÉRISATION HYDROGÉOCHIMIQUE DES AQUIFÈRES FISSURÉS DE LA RÉGION DU BÉLIER, CENTRE DE LA CÔTE D'IVOIRE

**Kouamé Marcousse EHOUSSOU¹, Amani Michel KOUASSI^{2*}
et Bamory KAMAGATÉ¹**

¹ *Université Nangui Abroguoua (UNA), Unité de Formation et de Recherche des Sciences et Gestion de l'Environnement (UFR-SGE), Laboratoire de Géosciences et Environnement (LGE), 02 BP 801 Abidjan, Côte d'Ivoire*

² *Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB), Département des Sciences de la Terre et des Ressources Minières (STeRMi), Laboratoire du Génie Civil, des Géosciences et des Sciences Géographiques, BP 1093 Yamoussoukro, Côte d'Ivoire*

* Correspondance, e-mail : michel.a_kouassi@yahoo.fr

RÉSUMÉ

L'objectif de cette étude est la caractérisation hydrogéochimique des aquifères fissurés de la région du Bélier (Centre de la Côte d'Ivoire). Les données physico-chimiques utilisées sont issues de la Direction Territoriale de l'Hydraulique de Yamoussoukro. La méthodologie relève d'une combinaison de plusieurs approches de nature statistique (caractéristiques statistiques, distribution des fréquences) et hydrochimique (diagramme de Piper, rapports d'ions, Indice d'Echanges de Bases, âge relatif des eaux). Les résultats obtenus montrent que les eaux étudiées sont relativement chaudes (25-30°C), relativement agressives (5,78-8,50), faiblement minéralisées (18-2465 µS/cm), douces (2,0-64,6 °F) et limpides (0-2,88 NTU). La qualité chimique des eaux souterraines étudiées est conforme dans l'ensemble aux normes OMS et ne présente pas de dangers majeurs pour la consommation humaine. Il existe cependant des forages où les teneurs en fer (13 %) et en manganèse (34 %) sont supérieures aux normes OMS. Ceux-ci présentent généralement une couleur rougeâtre et ont un goût désagréable. Le diagramme de Piper a permis d'identifier deux faciès dominants dans la région du Bélier: le faciès bicarbonaté (97,68 %) et le faciès chloruré (2,32 %). L'étude de certains rapports d'ions a confirmé également ce résultat. Les résultats de l'indice d'échanges de bases ont mis en évidence une dominance des concentrations des alcalins sur les alcalino-terreux. L'indicateur du temps de séjour a montré que les eaux de la région du Bélier sont récentes dans l'ensemble et évoluent dans un système ouvert.

Mots-clés : *hydrogéochimie, aquifères fissurés, Région du Bélier, Côte d'Ivoire.*

ABSTRACT**Hydrochemical characterization of hard rock aquifers in the “Bélier” area, Ivory Coast Center**

The objective of this study is the hydrogeochemical characterization of hard rock aquifers of the “Bélier” area (Ivory Coast Center). The physical and chemical data used are from the territorial directorate of water of Yamoussoukro. Methodology is a combination of several approaches to statistical (statistical characteristics, frequency distribution) and hydrochemical (Piper diagram, ion ratios, Index Basis Swap, relative age of the waters). The results show that the studied waters are relatively warm (25-30 °C), relatively aggressive (5.78 to 8.50), weakly mineralized (18-2465 µS/cm), sweet (from 2.0 to 64, 6 °F) and clear (0 to 2.88 NTU). The chemical quality of groundwater is studied broadly in line with WHO standards and does not present major dangers for human consumption. However, there are holes where the iron content (13 %) and manganese (34 %) are greater than the WHO standards. These usually have a reddish color and have an unpleasant taste. The piper diagram identified two dominant facies: facies bicarbonate (97.68 %) and chlorinated facies (2.32 %). The study of certain ions reports also confirmed this result. The results of the index of base exchanges showed a dominance of alkaline concentration on the alkaline-earth metal. The indicator residence time showed that the waters of the “Bélier” area are recent and generally operate in an open system.

Keywords : *hydrogeochemistry, hard rock aquifers, Region of “Bélier”, Ivory Coast.*

I - INTRODUCTION

En Côte d’Ivoire, les eaux de consommation proviennent de deux sources principales. La première source est constituée des eaux de surface et la deuxième source comprend les eaux souterraines. Ces eaux souterraines sont captées par des forages dans les aquifères continus (domaine sédimentaire) ou dans les aquifères discontinus (domaine du socle). Le socle occupant la majeure partie du territoire (97,5 %), la quasi-totalité des ressources en eaux souterraines qui y résident se trouvent dans les réservoirs fracturés hérités des différents événements tectoniques. Pour approvisionner les populations rurales des régions de socle en général et celles vivant dans la région du Bélier (Centre de la Côte d’Ivoire) en particulier, le gouvernement a réalisé plusieurs forages. Les informations physico-chimiques recueillies sur ces forages sont nécessaires pour l’analyse de la qualité de ces eaux en termes de

potabilité, mécanismes d'acquisition de la minéralisation, faciès des eaux, etc. En effet, la chimie des eaux constitue un complément indispensable à l'étude hydrogéologique des nappes et à la gestion des ressources en eau. La composition chimique d'une eau issue du milieu naturel dépend généralement de la nature géologique du sol d'où elle provient et aussi des substances réactives qu'elle rencontre lors de son écoulement [1 - 4]. Ainsi, la composition quantitative et qualitative de l'eau souterraine en matières en suspension et dissoutes, de nature minérale ou organique, détermine sa qualité [5, 6]. Les eaux souterraines sont aujourd'hui soumises à plusieurs contraintes de nature anthropique (agriculture, industrie, ménages, etc.), climatique, etc. [7 - 9]. Ces pressions sur les ressources en eau s'accompagnent d'une dégradation croissante et de plus en plus grave de leur qualité [10 - 14]. Il est donc essentiel d'analyser la qualité des eaux souterraines et de comprendre les mécanismes hydrogéochimiques en rapport avec la qualité de ces eaux afin de trouver les moyens de gérer ces ressources pour en assurer la durabilité. Cela suscite plusieurs interrogations : Quelles sont les caractéristiques hydrogéochimiques des aquifères de la région du Bélier? En d'autres termes, en quoi est-ce que la connaissance des caractéristiques hydrogéochimiques et la qualité de l'eau peuvent-elles aider à la gestion qualitative des ressources en eaux souterraines de la région du Bélier? L'objectif de cette étude est de caractériser du point de vue hydrogéochimique les aquifères fissurés de la région du Bélier dans le Centre de la Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest).

II - MATÉRIEL ET MÉTHODES

II-1. Présentation de la zone d'étude

La région du Bélier est située au Centre de la Côte d'Ivoire (*Figure 1*). Elle fait partie intégrante du « V Baoulé » et s'étend sur une superficie de 6 809 km². Elle compte 346 768 habitants avec une population essentiellement rurale agricole (agriculture de rente et vivrière) et une densité moyenne de 51,5 habitants/km².

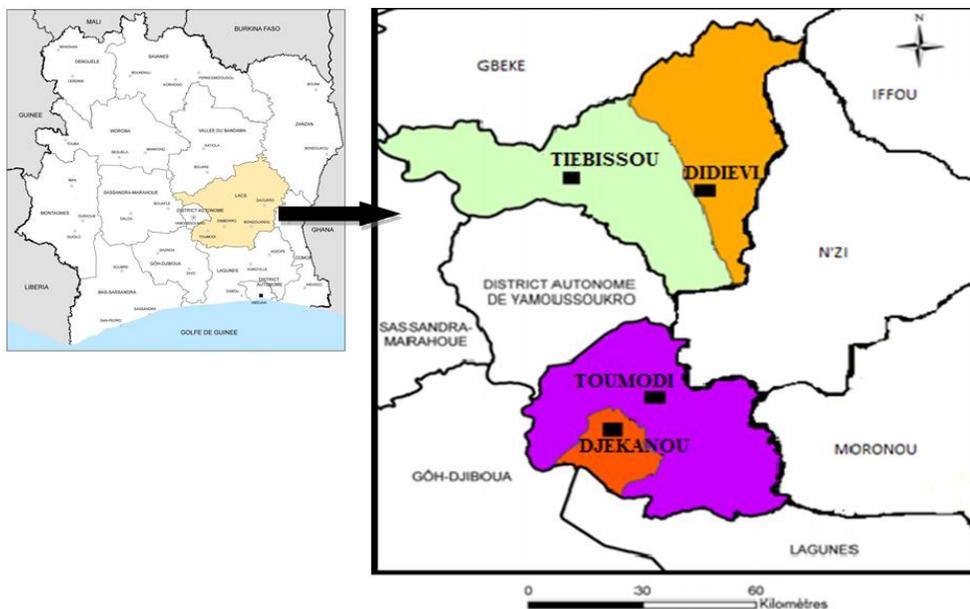


Figure 1 : Localisation de la région du Bélier (Centre de la Côte d'Ivoire)

Le relief de la région du Bélier est peu vallonné et correspond aux plateaux de la zone de savane arborée [15]. La zone d'étude est caractérisée par une monotonie des reliefs qui est favorable à la stagnation des eaux qui auront tendance à s'infiltrer et/ou s'évapotranspirer selon les conditions de perméabilité du substratum et l'intensité des activités évapotranspiratoires. L'altitude moyenne de la région comprise entre ces massifs est de 200 m. Les sols de la région du Bélier, majoritairement de type ferrallitique moyennement désaturé sont le socle d'une végétation constituée de forêt mésophile, de forêts-galeries, de savanes arbustives ou de savanes à rôniers. Le climat de la région est de type tropical humide et caractérisé par quatre saisons réparties entre la grande saison des pluies (Mars-Juin), la petite saison sèche (Juillet-Aout), la petite saison des pluies (Septembre-Octobre) et la grande saison sèche (Novembre-Février). Ces saisons sont sous l'influence de la mousson atlantique du Sud-Ouest et de l'harmattan en provenance du Sahara. La hauteur moyenne annuelle des précipitations est de 1092 mm/an tandis que la température moyenne est de 30°C. Le réseau hydrographique de la région est constitué des affluents du cours d'eau principal N'zi (affluent du Bandama blanc) que sont le Kan et le Kpra. La région du Bélier appartient au domaine paléoprotérozoïque (*Figure 2*). Elle est en outre située dans le domaine Birrimien de la Côte d'Ivoire. On y rencontre deux principales formations géologiques : les roches magmatiques constituées par les granitoïdes éburnéens (granites à biotite, granites à deux micas, migmatites, granodiorites concordants, pegmatites) et les roches métamorphiques (volcano-sédimentaires) du Birrimien représentées par les schistes, les quartzites et les roches vertes.

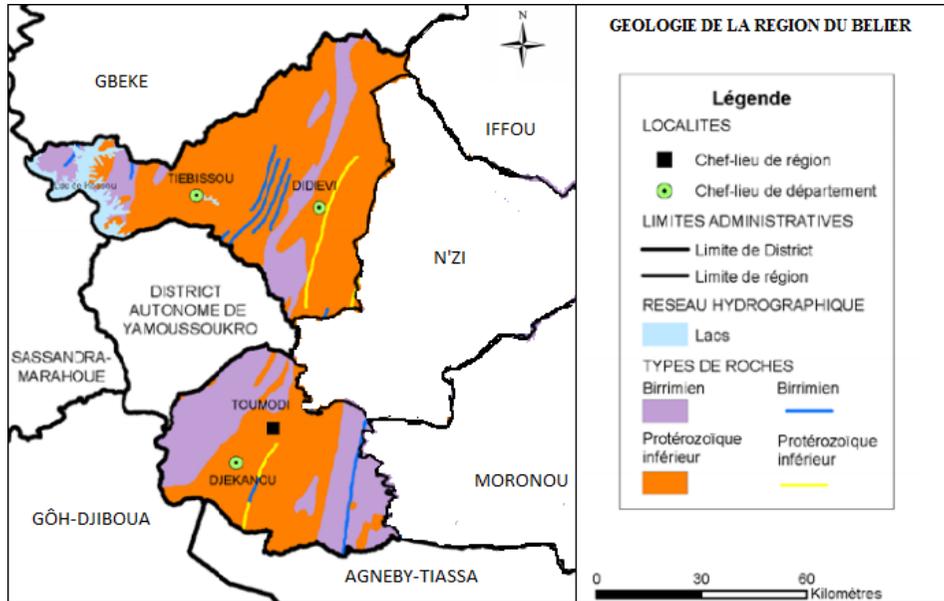


Figure 2 : Géologie de la zone d'étude [15]

II-2. Données

La présente étude est essentiellement basée sur l'analyse des fiches techniques de 48 forages d'eau couvrant l'ensemble de la zone d'étude. Les paramètres physiques étudiés sont la température, le pH, la turbidité et la conductivité électrique. Pour les paramètres chimiques, cette étude s'est intéressée au bicarbonate, au calcium, au magnésium, au sodium, au potassium, au chlore, au fer, au manganèse, au nitrate, au nitrite et au sulfate. Les paramètres physiques ont été mesurés *in situ*. Les échantillons d'eau destinés aux analyses chimiques ont été recueillis dans des bouteilles en polyéthylène pour être analysés au Laboratoire d'Analyse d'Abengourou (LPA) en 2009. Ces analyses ont été réalisées à l'aide d'un spectrophotomètre DR 2010 de type HACH. Ces données ont été recueillies lors du projet CESPPCC (Comité d'Examen et de Suivi des Projets et Programmes de la filière Café-Cacao) concernant la réalisation des forages d'exploitation équipés de pompes à motricité humaine dans l'Ouest de la Côte d'Ivoire. Elles sont issues de la consultation des fiches techniques de forages fournies par la Société Africaine de Forage (AFRIFOR). La fiabilité des données a été effectuée à partir de la régression linéaire réalisée entre la somme des cations majeurs et la somme des anions majeurs. Les données sont jugées fiables lorsque le coefficient de corrélation est supérieur à 0,7 [16, 17]. Une analyse de la conductivité électrique a aussi été utilisée pour l'étude de la fiabilité des données. En effet, la conductivité électrique nous renseigne sur le degré de minéralisation du fait

qu'elle soit étroitement liée à la présence des espèces ioniques en solution [18, 19]. L'analyse a consisté à l'étude de la corrélation linéaire entre les conductivités électriques mesurées et celles obtenues par calcul [20]. Les données utilisées proviennent de la Direction Territoriale de l'Hydraulique. Elles concernent d'une part les paramètres chimiques et d'autre part les paramètres physiques des eaux souterraines issus de 99 forages de la région du Bélier. Les paramètres chimiques sont constitués d'ions majeurs (Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-) ainsi que de quelques ions mineurs (Fe^{2+} , Mn^{2+} , O_2^-). Ils ont été obtenus après dosage dans des laboratoires. Les paramètres physiques, quant à eux, ont été obtenus *in situ*. Il s'agit de la conductivité électrique (CE), la dureté, la température, le pH et la turbidité.

II-3. Démarche méthodologique de l'étude

II-3-1. Analyse de la dureté

La dureté de l'eau est exprimée par le degré hydrotimétrique total ou titre hydrotimétrique total (THT). Ce paramètre physique est un indicateur de la minéralisation de l'eau. Il permet également d'apprécier la qualité de l'eau. Ainsi, on distingue trois grandes classes de dureté selon la valeur du THT :

- si $0 \leq \text{THT} \leq 15^\circ\text{F}$: eau douce;
- si $15 < \text{THT} \leq 30^\circ\text{F}$: eau mi-dure;
- si $\text{THT} > 30^\circ\text{F}$: eau dure.

II-3-2. Analyse de la conductivité électrique

La salinité ou concentration totale de l'eau est à l'origine des risques salins liés à une présence excessive de sels, quelle que soit leur nature. Elle se mesure aisément par la conductivité électrique (CE) de l'eau ($\mu\text{S}/\text{cm}$). Cette conductivité électrique doit être ramenée à une température de référence qui est de 25°C . Une fois ajustées, les conductivités électriques deviennent des données de conductivité spécifique. Les valeurs de la conductivité électrique peuvent être regroupées en quatre classes de risque salin [17] à savoir :

- $\text{CE} < 250 \mu\text{S}/\text{cm}$: risque faible (minéralisation faible);
- $250 < \text{CE} < 750 \mu\text{S}/\text{cm}$: risque moyen (minéralisation moyenne);
- $750 < \text{CE} < 2250 \mu\text{S}/\text{cm}$: risque élevé (minéralisation élevée);
- $\text{CE} > 2250 \mu\text{S}/\text{cm}$: risque très élevé (minéralisation très élevée).

II-3-3. Analyse des fréquences de distribution des paramètres physico-chimiques étudiés

Les caractéristiques statistiques telles que le minimum, le maximum, la moyenne, l'écart-type et le coefficient de variation ($\text{CV} = \text{écart-type}/\text{moyenne}$) des paramètres physiques et hydrodynamiques ont été déterminées.

Les fréquences de variation des paramètres étudiés ont été également analysées. En effet, il existe des règles à respecter pour réaliser une discrétisation correcte :

- i) aucune classe ne doit être vide ;
- ii) les limites de classe doivent couvrir l'ensemble de la distribution ;
- iii) les limites de classe ne doivent pas se chevaucher.

La **Formule** utilisée pour déterminer le nombre de classe est la règle de Iman et Conover (C) pour un échantillon de taille n (**Équation 1**) :

$$C = \text{int}\left(\frac{\ln n}{\ln 2}\right) = \text{int}(1,443 \ln n) \quad (1)$$

NB : Int = partie entière.

L'intervalle de classe (I) est calculé par (**Équation 2**) :

$$I = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{C} \quad (2)$$

Dans **l'Équation 6**, X_{\max} et X_{\min} sont respectivement les valeurs maximale et minimale observées sur l'ensemble des échantillons pour un paramètre donné, C le nombre de classes défini. On calcule ensuite à partir de « X_{\min} », les classes successives par addition de l'intervalle de classe I, d'abord à la valeur minimale observée sur l'échantillon, puis à la borne supérieure de chacune des classes jusqu'à obtention de la dernière classe. Les fréquences de distribution des différents paramètres étudiés ont été calculées à partir de l'effectif par classe (n_i) et de l'effectif total (n) au moyen de la relation suivante (**Équation 3**) :

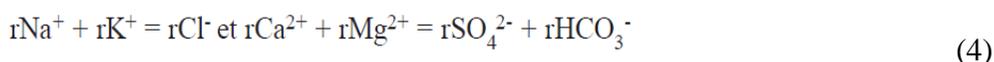
$$F_i = 100 \times \frac{n_i}{n} \quad (3)$$

L'établissement des classes de variables et la construction des courbes de fréquence ont été réalisés à l'aide du logiciel Microsoft Excel. En fait, les courbes de distribution de fréquence sont construites à partir des intervalles réguliers choisis.

II-3-4. Analyse hydrogéochimique

L'analyse hydrogéochimique a été réalisée à l'aide du digramme de Piper, du calcul de l'indice d'échange de base (IEB), des rapports d'ions et du calcul de l'âge relatif des eaux souterraines. Le diagramme de Piper a été utilisé pour

caractériser les faciès géochimiques des eaux de la région du Bélier. Ce diagramme est très fréquemment utilisé et donne de très bons résultats [18, 21 - 27]. Les différents traitements ont été possibles grâce au logiciel DIAGRAMME™. L'indice d'échanges de bases (IEB) désigne le rapport entre ions échangés et ions de même nature primitivement existant dans la solution. En effet, les substances échangeuses d'ions sont appelées permutolites [16]. Parmi ces permutolites, on distingue les minéraux argileux (kaolinite, halloysite, montmorillonite), les minéraux zéolithiques, les hydroxydes ferriques, les substances organiques (l'humus). 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. L'étude des rapports d'ions est une méthode essentielle car elle permet d'évaluer l'évolution de ces ions entre eux, d'identifier la dominance de certains ions sur d'autres. Par l'étude du chimisme de l'eau, cette méthode identifie les différents échanges entre les ions, à l'origine de la minéralisation de l'eau. Dans la zone d'étude, les principales formations géologiques qui affleurent sont représentées par les roches magmatiques et les formations métamorphiques (volcano-sédimentaires) du Birrimien. Par conséquent, le chimisme des eaux souterraines qui circulent dans les différents systèmes aquifères est tributaire de la composition minéralogique de ces formations des encaissants et leurs minéraux contribuent à la minéralisation de l'eau [28]. Afin de mieux

comprendre les processus de minéralisation des eaux dans la zone d'étude, nous avons établi des corrélations entre les éléments chimiques par le biais de diagrammes binaires. L'établissement de ces diagrammes binaires consiste à représenter sur un graphique 2D l'évolution d'un élément ou d'un rapport ionique en fonction d'un autre élément souvent supposé conservatif. Un indicateur qualitatif du temps de séjour des eaux dans les aquifères ou âge relatif des eaux souterraines a été calculé. Cet indicateur (I) permet d'apprécier l'âge relatif des eaux. Il est fonction des concentrations en Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+ et est calculé selon l'Équation suivante [17, 20] :

$$I = \frac{\text{Mg}^{2+} \times (\text{Na}^+ + \text{K}^+)}{(\text{Ca}^{2+})^2} \quad (7)$$

Cet indice est d'autant plus grand que le temps de séjour de l'eau dans la formation aquifère est long [20]. Les valeurs obtenues ont ensuite été normalisées selon l'Équation 10 et sont comprises entre 0,1 et 0,9.

$$I' = 0,8 \times \left(\frac{I - \min(I)}{\max(I) - \min(I)} \right) + 0,1 \quad (8)$$

avec, I : Indicateur d'âge relatif ; I' : Indicateur d'âge normalisé ; $\min(I)$ valeur minimale de la série de I ; $\max(I)$ valeur maximale de la série de I .

Ainsi :

- pour $0,1 \leq I' < 0,5$, l'eau est considérée d'âge récent ;
- pour $0,5 \leq I' \leq 0,9$, l'eau est considérée d'âge ancien.

III. RÉSULTATS

III-1. Analyse des paramètres physiques des eaux souterraines

Les caractéristiques statistiques des paramètres physiques des eaux souterraines de la région du Bélier sont consignées dans le **Tableau 1**.

Tableau 1 : Caractéristiques statistiques des paramètres physiques

Paramètres	Température (°C)	pH	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Turbidité (NTU)	Dureté (°F)
Minimum	25,3	5,78	18,82	0,2	2
Moyenne	27,34	6,74	252,56	0,71	12,56
Maximum	30,1	8,5	2463,34	2,88	64,6
Ecart type	1,17	0,55	405,19	0,44	9,77
Coefficient de variation	4,29	8,2	160,43	62,03	77,81
Normes OMS	<30	6,5 < pH < 8,5	<400	≤ 5	30

La température des eaux souterraines de la région du Bélier est comprise entre 25,3°C et 30,1°C avec une moyenne de $27,34 \pm 1,17$ °C (**Tableau 1**). Ces températures sont conformes à la norme OMS. Les valeurs les plus fréquentes de température se situent entre 26 et 28°C et représentent plus de 55 % des échantillons d'eau. Les classes de fréquences moyennes sont comprises d'une part, entre 25 et 26°C avec une fréquence de 15,12 % et d'autre part, entre 28 et 30°C (27,91 %). Quant aux valeurs du pH de la région du Bélier, elles se situent entre 5,78 et 8,5 avec une moyenne de $6,74 \pm 0,55$ (**Tableau 1**). 69 % des forages étudiés appartiennent à l'intervalle [6,5 ; 8,5] définie par la norme OMS tandis que 31 % sont inférieurs à 6,5, ce qui traduit une relative agressivité de ces eaux. Les conductivités électriques mesurées sur le terrain et calibrées à une température de 25°C sont comprises entre 18,82 et 2463,34 $\mu\text{S}/\text{cm}$ avec une moyenne de 252,56 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (**Tableau 1**). Les valeurs de conductivité électrique les plus fréquentes sont celles inférieures à 250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (environ 73 % des échantillons observés). La majeure partie des eaux de cette région a donc une minéralisation faible (salinité faible). La classe de minéralisation moyenne représente 23 % des échantillons.

Enfin, les classes de minéralisation élevée et très élevée totalisent une fréquence d'environ 4 %. Près de 85 % des forages ont une conductivité électrique inférieure à la limite définie par la norme OMS (400 $\mu\text{S}/\text{cm}$) alors que 15 % présentent une conductivité électrique supérieure à la norme. Les forages d'eau de la région du Bélier ont une turbidité qui varie de 0,2 à 2,88 NTU avec une moyenne de $0,71 \pm 0,44$ NTU et respectent la norme OMS (**Tableau 1**). Les valeurs les plus fréquentes se situent entre 0 et 1 NTU et représentent plus de 79 % des échantillons d'eau. Les classes de fréquences moyennes sont comprises entre 1 et 2 NTU avec une fréquence de 18,60 %. Les turbidités supérieures à 2 NTU sont très rarement observées. La dureté des eaux souterraines va de 2 à 64,6 °F avec une moyenne de 12,56 °F. Les eaux douces sont les plus fréquentes et représentent 73,26 % des points d'eau. Les eaux mi-dures représentent 23,25 %. Enfin, les eaux dures représentent 3,49 % des points d'eau étudiés. Les séries de température et de pH sont homogènes alors celles constituées par la conductivité électrique, la turbidité et la dureté sont hétérogènes.

III-2. Analyse des paramètres chimiques des eaux souterraines

Les caractéristiques statistiques des paramètres chimiques des eaux souterraines de la région du Bélier sont consignées dans le **Tableau 2**.

Tableau 2 : Caractéristiques statistiques des paramètres chimiques

Paramètres	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Fe ²⁺	Mn ²⁺	O ₂
Minimum	2	0,49	0,98	3,11	36,60	0	1,46	0	0	0	0
Moyenne	21,70	10,18	10,98	34,82	215,89	3,15	16,89	2,36	0,15	0,06	4,58
Maximum	105,80	40,08	52,94	167,80	1305	20	117	50	1,73	0,64	6,90
Ecart-type	19,02	8,17	9,62	30,49	152,97	3,73	18,85	6,63	0,29	0,10	3,09
CV (%)	86,59	80,31	87,55	87,55	70,86	118,5	111,60	281	188	177	67,50
Normes OMS	100	50	12	150	—	50	250	250	0,3	0,05	—

L'analyse du **Tableau 2** révèle que les concentrations en calcium (Ca²⁺) varient de 2 mg/L à 105,81 mg/L avec une moyenne de 21,7 mg/L. Tous les forages de la région du Bélier présentent presque des concentrations inférieures à la norme OMS. Les concentrations en calcium les plus fréquentes de la région se situent entre 0 et 20 mg/L et représentent environ 63 % des points d'eau étudiés. Les concentrations en magnésium (Mg²⁺) vont de 0,49 à 40,08 mg/L avec une moyenne de 10,18 mg/L et respectent toutes les normes OMS. Les concentrations les plus fréquentes de la région se situent entre 0 et 10 mg/L, soit environ 65 % des échantillons d'eaux. Les teneurs en potassium (K⁺) oscillent entre 0,98 et 52,94 mg/L avec une moyenne de 10,98 mg/L (**Tableau 2**). Les concentrations les plus fréquentes se situent entre 0 et 12 mg/L, soit environ 69 % des échantillons d'eaux. Ces concentrations sont inférieures à la limite de potabilité définie pour les eaux de consommation humaine. En dehors de celles-ci, les autres concentrations sont au-dessus de la norme de potabilité des eaux. Quant aux teneurs en sodium (Na⁺), elles fluctuent entre 3,11 et 167,84 mg/L avec une moyenne de 34,82 mg/L.

Les concentrations les plus fréquentes sont comprises entre 0 et 25 mg/L avec une fréquence de 48,84 % et entre 25 et 50 mg/L avec une fréquence de 32,56 %. Au regard de la norme OMS, toutes les eaux sont quasiment conformes. L'analyse des anions majeurs montre que les valeurs du bicarbonate varient de 36,6 à 1305 mg/L avec une moyenne de 215,89 mg/L. Les concentrations les plus fréquentes sont comprises entre 100 et 200 mg/L et représentent environ 58 % des points d'eau. Les concentrations en nitrate (NO₃⁻) s'échelonnent sur l'intervalle 0-20 mg/L avec une moyenne de 3,15 mg/L (**Tableau 2**) et sont conformes à la norme OMS. Les concentrations les plus fréquentes sont comprises entre 0 et 2 mg/L avec une fréquence de 61,63 % suivies de celles comprises entre 5 et 10 mg/L avec une fréquence de 32,56 %. Les valeurs d'ions chlorures vont de 1,46 à 117,02 mg/L, avec une moyenne de 16,89 mg/L (**Tableau 2**). Les teneurs les plus fréquentes sont comprises entre 0 et 20 mg/L (80 %). Elles sont toutes inférieures à la norme de potabilité définie pour les eaux de consommation (250 mg/L). Quant aux valeurs de sulfate, elles s'étalent sur la gamme 0-50 mg/L avec une moyenne de 2,36 mg/L. Les valeurs les plus fréquentes

sont celles comprises entre 0 et 2 mg/L et représentent environ 76,74 % des échantillons. Toutes les teneurs de sulfate des points d'eau étudiés sont en dessous de la norme de potabilité (< 250 mg/L). Les cations majeurs et les anions majeurs étudiés ont une répartition hétérogène dans l'espace. Les valeurs minimales du fer et du manganèse des eaux souterraines de la région sont nulles avec respectivement une moyenne de $0,15 \pm 0,29$ mg/L et $0,06 \pm 0,102$ mg/L. Environ 87 % des points d'eau ont des teneurs en fer comprises entre 0 et 0,3. Ces derniers respectent la norme de potabilité définie ($\leq 0,3$ mg/L) tandis que 13 % ont des concentrations supérieures à la norme. En ce qui concerne le manganèse, 64 % des échantillons ont des concentrations comprises entre 0 et 0,05, donc inférieures à la norme de potabilité ($\leq 0,05$ mg/L), contre 36 % dont les concentrations excèdent la norme. Quant à l'oxygène dissous (O_2), les teneurs varient de 0 à 6,9 mg/L avec une moyenne de 4,58 mg/L (**Tableau 2**). Les teneurs les plus fréquentes de la région sont celles comprises entre 3,5 et 7 mg/L soit environ 69 % des points d'eau étudiés. Les ions mineurs étudiés tels que le fer et le manganèse ainsi que l'oxygène dissous, ont aussi une répartition hétérogène dans l'espace.

III-3. Analyse des rapports d'ions

La **Figure 3** présente respectivement les diagrammes binaires Na^+/Cl^- et Na^+/Ca^{2+} . L'analyse du diagramme des teneurs en Na^+ en fonction des teneurs en Cl^- met en évidence un excès en Na^+ . Il est constaté que la majorité des points d'eau présente un net enrichissement en Na^+ (80%). Les données analytiques de ce diagramme déviant de la droite de pente 1:1 indiquent qu'une large fraction du sodium serait associée à un anion autre que le chlorure. A partir de la même **Figure 3** (rapport Na^+/Ca^{2+}), il est constaté que la majorité des points d'eau présente un net enrichissement en Na^+ . Cet enrichissement en sodium serait lié aux différents processus d'interaction eau-roche ; l'encaissant pouvant libérer du Na^+ après avoir fixé le Ca^{2+} .

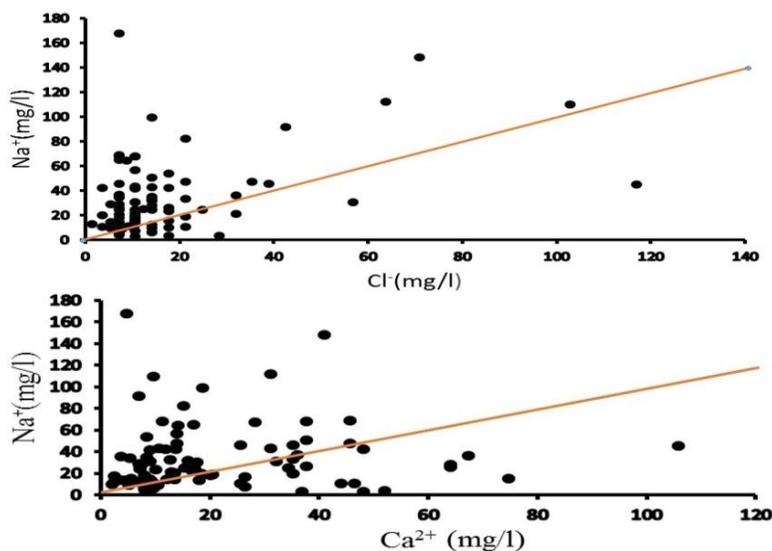


Figure 3 : Rapports Na^+/Cl^- et Na^+/Ca^{2+}

L'analyse du diagramme Mg^{2+} en fonction de Ca^{2+} de la **Figure 4**, indique que plus de 75 % des valeurs sont situées au-dessus de la droite de pente 1:1. Ce qui traduit une dominance des ions Mg^{2+} sur les ions Ca^{2+} .

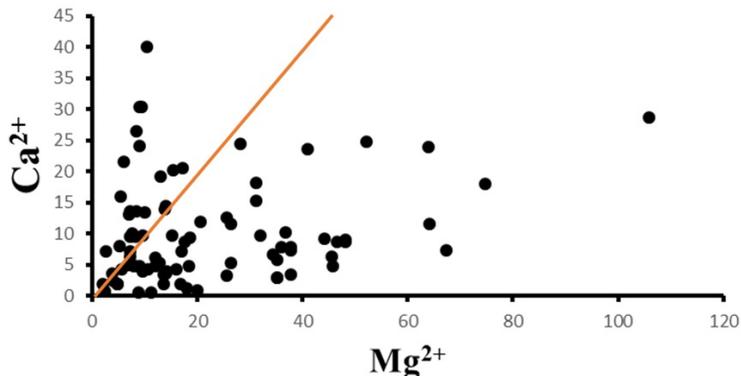


Figure 4 : Rapport Ca^{2+}/Mg^{2+}

D'après les diagrammes de la **Figure 5**, représentant d'une part HCO_3^- en fonction de Ca^{2+} , et d'autre part, HCO_3^- en fonction de Mg^{2+} , il ressort que tous les points d'eau présentent une très nette prédominance des ions bicarbonates sur les ions calcium et magnésium, lequel est l'espèce dominante dans 68 % des échantillons prélevés. Elle montre également que la majorité des points d'eau s'écartent de la droite $y = x$ indiquant une autre source pour le magnésium que la dolomie. L'origine du magnésium peut être associée à la dissolution des aluminosilicates tels que la biotite.

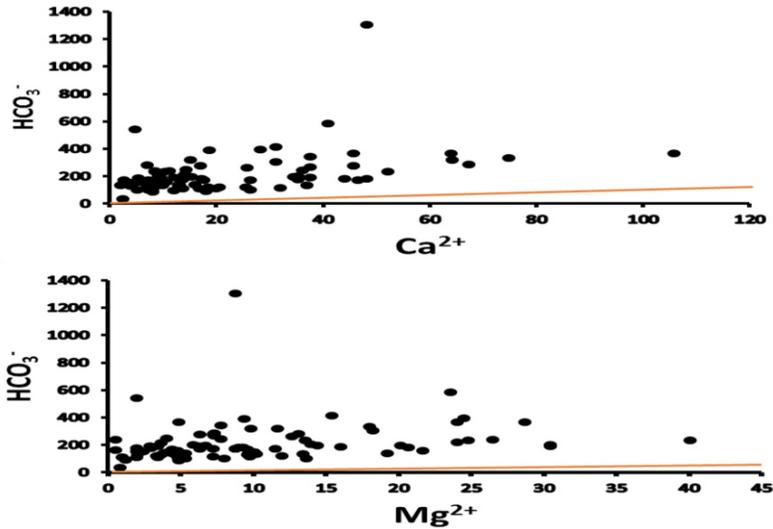


Figure 5 : Rapports HCO_3^-/Ca^{2+} et HCO_3^-/Mg^{2+}

III-4. Analyse des faciès hydrogéochimiques

La représentation de l'ensemble des forages d'eau dans le diagramme de Piper permet de dégager deux grands points (*Figure 6*) :

- -97,68 % des eaux souterraines de la région du Bélier présentent un faciès bicarbonaté ;
- -2,32 %, soit deux points d'eau, montrent un faciès chloruré.

Il ressort que les eaux de la région du Bélier ont une prédominance pour le faciès bicarbonaté. En effet, 54,65 % des eaux de cette région ont un faciès bicarbonaté sodi-potassique et 43,03 %, un faciès bicarbonaté calcique et magnésien.

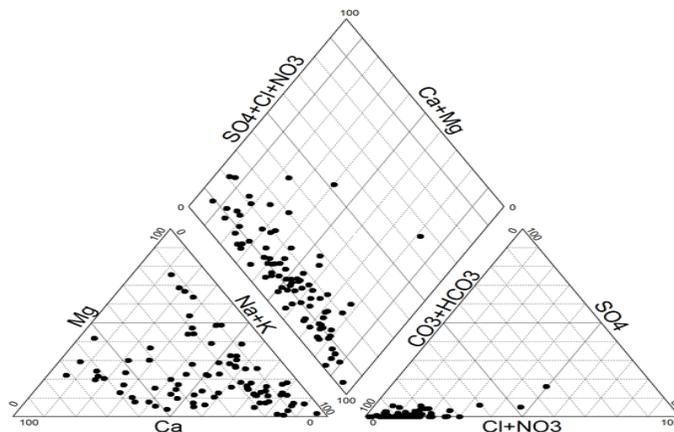


Figure 6 : Faciès des eaux souterraines de la région du Bélier selon le diagramme de Piper

III-5. Analyse des indices d'échanges de bases et analyse de l'indicateur d'âge relatif des eaux souterraines

L'analyse de la *Figure 7* révèle que 86 % des eaux de la région du Bélier présentent un indice négatif tandis que 14 % de ces eaux présentent un indice positif. Dans le premier cas, l'IEB négatif révèle qu'il y a échanges des alcalino-terreux des eaux (Ca^{2+} et Mg^{2+}) contre les alcalins (Na^+ et K^+) des permutolites. Par contre, l'IEB positif traduit des échanges des alcalins des eaux contre les alcalino-terreux des permutolites. Cette dominance des IEB négatifs sur les IEB positifs, traduit normalement le fait que dans la plupart des eaux de la région du Bélier, les ions Na^+ et K^+ sont dominants par rapport aux ions Ca^{2+} et Mg^{2+} .

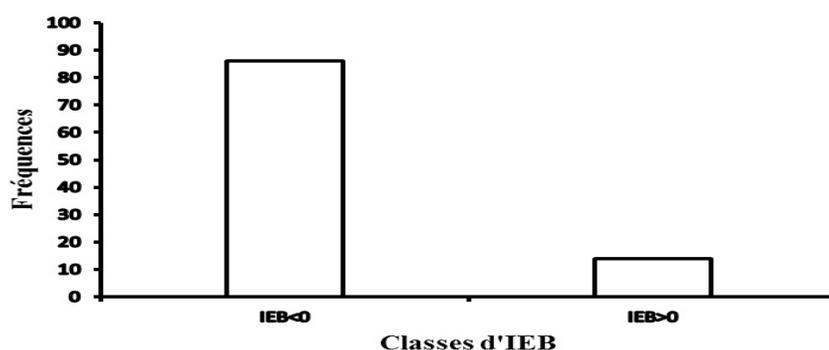


Figure 7 : Histogramme des classes d'IEB des eaux souterraines du Bélier

L'analyse de la *Figure 8* montre que les valeurs les plus fréquentes concernant les classes d'âge se situent entre 0,1 et 0,5 et représentent 94 % des valeurs observées. Ces eaux sont dites d'âge récent. Les valeurs moins fréquemment obtenues sont situées entre 0,5 et 0,9 avec un taux de 6 %. Les eaux se trouvant dans cet intervalle sont dites d'âge ancien.

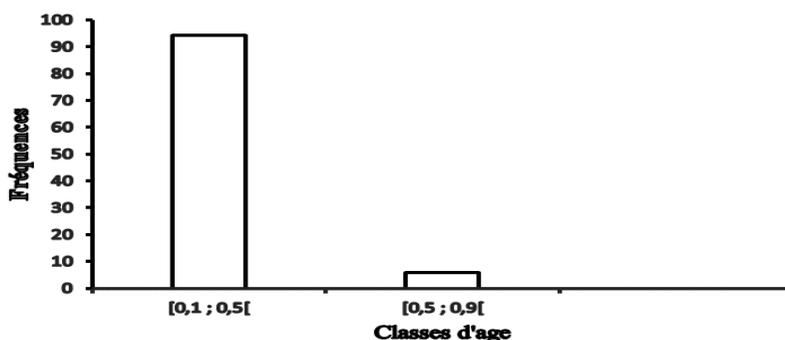


Figure 8 : Histogramme des classes d'âge relatif des eaux souterraines du Bélier

IV - DISCUSSION

IV-1. Paramètres physico-chimiques et potabilité des eaux souterraines

Les eaux souterraines de la région du Bélier sont relativement chaudes (25-30°C), relativement agressives (5,78-8,50), faiblement minéralisées (18-2465 $\mu\text{S}/\text{cm}$), douces (2,0-64,6 °F) et limpides (0-2,88 NTU). En effet, les valeurs de la température (25-30 °C) rencontrées dans la région du Bélier correspondent aux variations saisonnières des températures atmosphériques ambiantes, cela indique l'ouverture du système aquifère. En effet, une température élevée des eaux souterraines favorise une augmentation de l'activité chimique ou bactérienne et l'évaporation de ces eaux d'où la formation et la concentration de certains sels minéraux comme le gypse (CaSO_4). La présence de ce sel dans les eaux rend celles-ci séléniteuses donc impropres à la consommation. Les valeurs du pH de la région du Bélier (5,78-8,50) mettent en évidence une part importante d'eaux agressives (31 %). En effet, l'acidité des eaux constitue un des caractères essentiels des eaux en Côte d'Ivoire. L'acidité des eaux en zone tropicale humide est principalement liée à la décomposition de la matière organique végétale, avec la production de CO_2 dans les premières couches du sol. Ainsi, selon [29], la présence dans l'eau de CO_2 provenant des sols facilite-t-elle l'hydrolyse des minéraux silicatés et la formation des ions HCO_3^- . C'est ce phénomène qui explique l'abondance des bicarbonates dans les eaux de la région.

En effet, les forages de pH inférieur à 6,5 sont de faibles profondeurs. La faible minéralisation des eaux de la région du Bélier serait liée au facteur structural [27]. En effet, la circulation de l'eau se fait le long des zones de circulation privilégiée, 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 homogène. Seuls quelques forages présentent une forte minéralisation. Ces forages présentent une température faible (moins de 26°C). Un effet de lessivage des sols dans les zones froides ou pendant les périodes fraîches (faible température: présence d'averses, de pluies) pourrait expliquer l'augmentation de la minéralisation de ces eaux. En outre une pollution d'origine superficielle ne serait pas à écarter. Les forages à dureté indésirable (THT > 30°F) sont caractérisés par des eaux difficilement moussantes, et qui forment des flocons avec le savon. Ces eaux sont aussi caractérisées par un dépôt (calcaire) au fond des casseroles lorsqu'elles sont portées à ébullition. Ce phénomène s'accroît avec la température. Cependant, une eau trop douce pourrait-elle aussi présenter certains risques pour les personnes souffrant d'hypertension à cause du fort taux de sodium. Les valeurs de turbidité enregistrées dans le secteur d'étude

sont toutes en dessous de la norme OMS (< 5 NTU) traduisant ainsi un faible taux de matière en suspension dans les eaux. Cependant, 79 % des points d'eau peuvent être qualifiés comme exempts de matière en suspension car compris dans l'intervalle 0-1 mg/L ; ce qui est d'ailleurs recommandé par les normes OMS. Les points d'eau ayant des valeurs de turbidité comprises entre 1 et 5 mg/L (21 %) ne présentent néanmoins pas de risques majeurs. Tous les forages de la région du Bélier présentent presque des concentrations en calcium inférieures à la norme OMS (< 100 mg/L). En effet, de fortes teneurs en calcium peuvent provoquer la formation de tartre, entraîner l'utilisation excessive du savon dans les lessives et rendre la cuisson des légumes difficile. Tous ces effets d'ordre purement esthétique sont liés à la dureté totale de l'eau ($\Sigma Ca+rMg$). Par ailleurs, le calcium possède des effets bénéfiques. Il peut en effet bloquer l'absorption de métaux lourds, accroître la masse osseuse et prévenir certains types de cancers [29]. Cependant, à des concentrations très élevées, il peut avoir des effets négatifs sur l'absorption d'autres minéraux essentiels pour le corps. En effet, de fortes teneurs en magnésium pourraient dégrader les qualités esthétiques de l'eau puisqu'elles augmentent la dureté de celle-ci. Les concentrations en magnésium respectent toutes les normes OMS (< 50 mg/l). 69 % des échantillons d'eaux respectent les normes OMS au regard du potassium (0-12 mg/L).

Cela est attribuable à la présence des formations argileuses riches en potassium dans l'aquifère. En effet, le potassium provient de l'altération des formations silicatées (gneiss, schiste), des argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimiques. En outre, il faut noter que les eaux de pluie ont une influence considérable dans la production des ions K^+ [29]. Quant aux teneurs en sodium, elles sont quasiment (98,8 %) conformes aux normes OMS. Les concentrations en ions chlorures et ions sulfates sont toutes inférieures à la norme de potabilité définie pour les eaux de consommation (250 mg/L). De faibles teneurs en sulfates et en chlorures ont donc été obtenues au niveau des points d'eau de la région du Bélier. Des résultats similaires ont été obtenus sur les eaux souterraines dans d'autres régions de la Côte d'Ivoire [17, 29]. Ces faibles teneurs en sulfates constituent une caractéristique des eaux souterraines de la Côte d'Ivoire en particulier et de l'Afrique de l'Ouest en général [27]. Les fortes teneurs en Cl^- sont plus rencontrées dans les eaux du bassin côtier du pays [27, 29]. De faibles teneurs en nitrates ont été obtenues au niveau des eaux souterraines de la zone d'étude. Cette caractéristique est due 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) [29]. Les nitrates ne sont pas toxiques en eux-mêmes. Cependant, lorsqu'ils sont transformés en nitrites et en

composés nitrosés (nitrosamines et nitrosamides), ils peuvent alors devenir dangereux pour l'organisme. La toxicité des nitrates survient lorsqu'il y a une ingestion massive ou lorsqu'ils sont transformés en nitrites dans l'organisme. En somme, ce sont les nitrites qui sont dangereux pour l'homme, car ils sont à la base de la méthémoglobine dont la maladie manifestée est la méthémoglobinémie. La méthémoglobine est incapable de transporter l'oxygène vers les tissus et peut dans pareils cas provoquer une cyanose (asphyxie) et des troubles de conscience pouvant évoluer vers la mort par anoxie cérébrale notamment chez les nourrissons de moins de 6 mois [29]. En général, les cas de méthémoglobinémie apparaissent quand les taux de nitrates dans l'eau de consommation dépassent 50 mg/L. Ce qui n'est pas le cas pour les eaux de la région du Bélier car elles sont toutes conformes aux exigences de la norme OMS. Par contre, les eaux des aquifères fissurés du Bélier présentent de très fortes concentrations en bicarbonates avoisinant 250 mg/L. Il en est de même pour certains auteurs ayant travaillé sur les eaux du socle de la Côte d'Ivoire [17, 27, 29]. De fortes teneurs en fer (13 %) et en manganèse (34 %) ont été enregistrées dans certaines localités de la zone d'étude et constituent un important souci.

En effet, les teneurs élevées en fer et en manganèse pourraient avoir des conséquences organoleptiques et sanitaires mais elles peuvent également détériorer le caractère esthétique de l'eau. Le fer et le manganèse 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 des forages vers d'autres sources d'approvisionnement dont les qualités bactériologiques et parasitologiques sont parfois douteuses. Ce qui peut avoir des conséquences graves sur leur santé. 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. La valeur moyenne d'oxygène dissous (4,58 mg/L) dépasse légèrement la valeur naturelle des eaux (3 mg/L). Ces teneurs indiquent que les points sont localisés dans des endroits où les formations sont perméables et/ou un contact existe entre les eaux de surface et les eaux souterraines par le biais de réseaux de failles et de fractures. Dans ce cas, une alimentation directe de l'aquifère par les eaux d'infiltration issues de pluies, de surface, est très possible.

IV-2. Typologie des eaux et origines des ions

L'étude de la typologie des eaux a permis d'identifier deux faciès hydrochimiques : le faciès bicarbonaté (97,68 % dont 54,65 % de bicarbonaté sodi-potassique et 43,03 % de bicarbonaté calcique et magnésien) et le faciès chloruré (2,32 %). Le faciès bicarbonaté est donc le faciès dominant dans les eaux souterraines de la région du Bélier. Ce résultat est en accord avec celui de plusieurs auteurs ayant travaillé en Afrique de l'Ouest et qui ont tous abouti à la conclusion que le faciès bicarbonaté est le plus représenté dans les eaux du socle [27, 29, 30]. Par contre, en zone sédimentaire, c'est plutôt le faciès chloruré sodi-potassique qui est le plus représenté [31]. La dominance du faciès bicarbonaté dans les eaux de socle est à rattacher à l'origine de la production des ions bicarbonatés. En effet, les bicarbonates sont essentiellement produits par l'altération des silicates lors de l'acquisition de la charge saline des eaux dans la zone d'aération [30]. Le rapport Na/Cl indique qu'il y a un apport de sodium. L'enrichissement en Na est à relier avec des processus d'interaction eau-roche (les roches volcaniques étant riches en sodium) [28].

En effet, un ratio Na/Cl supérieur à 1 (cas de la majorité de nos échantillons) est généralement interprété comme reflétant la libération (relargage) de Na^+ à partir des réactions d'altération des silicates [28]. La dissolution des silicates peut être une probable source de sodium dans les eaux souterraines de la zone d'étude. Une source potentielle d'excès en Na^+ est l'altération de plagioclase sodique (tel que l'albite) dans les roches volcaniques de la zone d'étude. Ainsi, durant la percolation, le ratio Na/Cl augmente progressivement par dissolution du sodium dans les roches volcaniques (altération de plagioclases comme l'albite). Grunberger (1989) in Mohamed [28] a montré d'une part, que les chlorures restent en solution dans le sol et leur concentration augmente par évaporation, et que les chlorures dans les roches volcaniques sont pratiquement indisponibles pour la dissolution lors de la percolation et d'autre part, que le sodium présent dans les eaux souterraines est le résultat de l'hydrolyse des minéraux riches en sodium (albite) [28]. Si nous nous situons dans le contexte géologique de notre étude, cet élément pourrait donc provenir de l'altération des feldspaths potassiques et sodiques (microcline, albite, orthose) et de celle des micas. **L'Équation** gouvernant la dissociation de l'albite est la suivante :



Le rapport Na/Ca quant à lui, traduit le fait que l'encaissant a libéré du Na^+ après avoir fixé le Ca^{2+} . De plus, le rapport $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ qui est supérieur à 2 dans plus de 54 % des zones échantillonnées, traduit le fait que l'écoulement

se fait de façon relativement rapide ces zones [32]. Ces résultats confirment ceux de l'indice d'échanges de bases. En effet, les eaux provenant de l'altération des roches cristallines et cristallophylliennes ont, presque toujours, un IEB négatif, puisque la destruction des silicates amène beaucoup plus d'alcalins que d'ions chlore en solution [29]. Cependant, il faut noter que pour certaines valeurs très négatives de l'IEB ($IEB < -0,09$), qui devraient correspondre à une nette régression des alcalino-terreux au profit de Na^+ et K^+ , les variations des rapports caractéristiques montrent que Ca^{2+} et Mg^{2+} sont dominants :

- -soit parce que le déséquilibre entre chlore et alcalins n'est pas lié aux échanges de base ; car les eaux provenant des roches cristallines et cristallophylliennes peuvent présenter gratuitement des valeurs de l'IEB négatives ou positives en absence de tout échange de bases entre eaux et permutolites ;
- -soit parce que l'abondance des alcalino-terreux (Ca^{2+} et Mg^{2+}) dans les solutions au moment de leur arrivée dans le réservoir, d'une part, et les faibles proportions d'ions échangés, d'autre part, ne permettent pas d'observer quantitativement la diminution de Ca^{2+} et Mg^{2+} que reflètent les valeurs négatives de l'IEB.

IV-3. Age relatif des eaux souterraines

Les eaux souterraines de la région du Bélier ont dans la majorité des cas, des valeurs d'indicateur d'âge relatif inférieures à 0,5. Ces eaux peuvent donc être dites « récentes ». Cela signifie que ces eaux sont toujours soumises à l'action des agents atmosphériques (pluies). Elles sont toujours alimentées par ces agents. En effet, l'évolution des eaux dans un système ouvert à l'atmosphère permet aux aquifères de se charger en CO_2 nouvellement infiltré [29]. C'est la pluie qui entraîne le CO_2 à partir de l'atmosphère. Lors de la percolation par les eaux de pluies, les éléments chimiques entrent en contact avec les eaux des aquifères pour les alimenter. Ainsi, toute eau située à très grande profondeur (80 - 100 m) et qui contient des quantités appréciables en CO_2 peut être considérée comme récente dans l'aquifère. De ce fait, les carbonates n'ont pas eu le temps de précipiter. Par conséquent, l'hydrolyse des silicates qui nécessite du CO_2 est donc très active [29]. Ce phénomène est le mécanisme principal qui gouverne le chimisme des eaux souterraines dans la zone d'étude. Par contre, les eaux d'âges anciens impliquent une influence moindre de ces agents ou une absence du phénomène d'alimentation de ces eaux. Ces eaux présentent un très faible taux de CO_2 .

V - CONCLUSION

Les résultats obtenus montrent que les eaux étudiées ont des températures qui varient entre 25,30 et 30,10 °C, avec une moyenne de 27,34 °C. Leurs pH oscillent entre 5,78 et 8,50, avec une moyenne de 6,74. La turbidité des eaux souterraines reste très faible avec des valeurs qui varient entre 0,20 et 2,88 NTU, pour une moyenne de 0,71 NTU. La conductivité électrique (corrigée à 25 °C) des eaux varie entre 18,82 et 2463 µS/cm, avec une moyenne de 252,56 µS/cm. La majorité des échantillons d'eau a une conductivité électrique inférieure à 250 µS/cm (73 %). La dureté des eaux est comprise entre 2,0 et 6,46 °F, avec une moyenne de 12,56 °F. Les eaux étudiées sont donc relativement agressives, faiblement minéralisées, douces et limpides. De façon générale, la qualité physique des eaux souterraines étudiées est conforme aux normes OMS. La qualité chimique des eaux souterraines étudiées est conforme dans l'ensemble aux normes OMS et ne présente pas de dangers majeurs pour la consommation humaine. Il existe cependant des forages où les teneurs en fer (13 %) et en manganèse (34 %) sont supérieures aux normes OMS. Les eaux de ces forages présentent généralement une couleur rougeâtre et ont un goût désagréable. Le diagramme de Piper a permis d'identifier deux faciès dominants dans la région du Bélier : le faciès bicarbonaté (97,68 %) et le faciès chloruré (2,32 %). L'étude de certains rapports d'ions a confirmé également ce résultat. Les résultats de l'indice d'échanges de bases ont mis en évidence une dominance des concentrations des alcalins sur les alcalino-terreux. L'indicateur du temps de séjour a montré que les eaux souterraines de la région du Bélier sont en général (94 %) récentes dans l'ensemble et évoluent dans un système ouvert. En perspectives, une prédiction des teneurs en fer et en manganèse s'avère donc nécessaire. De même, cette étude doit être poursuivie par l'élaboration d'une cartographie hydrochimique en vue de connaître la répartition spatiale des paramètres physico-chimiques.

RÉFÉRENCES

- [1] - Z. MFONKA, J. R. NDAM-NGOUPAYOU, P. D. NDJIGUI, M. ZAMMOURI, A. KPOUMIE, E. RASOLOMANANA, « Hydrochimie et potabilité des eaux du bassin versant du Nchi dans le plateau Bamoun (Ouest Cameroun) ». *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 9, N°4 (2015) 2200 - 2218
- [2] - A. A. DOUGNA, M. D. GNAZOU, T. KODOM, G. DJANEYE-BOUNDJOU, M. L. BAWA, « Physico-chimie et qualité des eaux des forages d'hydraulique villageoise dans la région centrale au Togo ». *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 9, N°4 (2015) 2249 - 2262

- [3] - A. M. KOUASSI, K. E. AHOUSI, K. E. KOUAKOU, A. MAMADOU, J. BIEMI, « Analyse comparative entre la distribution des fréquences de conductivité électrique et les faciès géochimiques des eaux des aquifères de socle (Côte d'Ivoire) ». *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 10, N°1 (2016) 435 - 446
- [4] - J. SEIDU, A. EWUSI, « Assessment of groundwater quality using hydrogeochemical indices and statistical analysis in the TARKWA mining area of Ghana ». *Journal of Environmental Hydrology*, Vol. 26, N°1 (2018) 1 - 13
- [5] - P. JAIN, J. D. SHARMA, D. SOHU, P. SHARMA, « Chemical analysis of drinking water of villages of Sanganer Tehsil, Jaipur District ». *International Journal of Environment, Sciences and Technology*, Vol. 2, N°4 (2014) 373 - 379
- [6] - K. E. AHOUSI, N. K. KEUMEAN, A. M. KOUASSI, Y. B. KOFFI, « Etude des caractéristiques hydrogéochimiques et microbiologiques des eaux de consommation de la zone périurbaine de la ville de Man : cas du village de Kpangouin (Côte d'Ivoire) ». *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 11, N°6 (2018) 3018 - 3033
- [7] - M. S. ABDOU-BABAYE, I. SANDAO, M. B. SALEY, I. WAGANI, B. OUSMANE, Comportement hydrogéochimique et contamination des eaux des aquifères fissurés du socle précambrien en milieu semi-aride (Sud-Ouest du Niger). *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 10, N°6(2016) 2728 - 2743
- [8] - E. I. GOLOVINA, « Relevant issues in state regulation of groundwater extraction in RUSSIA ». *Journal of Environmental Hydrology*, Vol. 25, N°5 (2017) 1 - 11
- [9] - K. G. N'GUETTIA, O. M. J. MANGOUA, K. N. ABOUA, G. A. DOUAGUI, D. L. GONE, « Caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines du bassin versant de la Baya, Est Côte d'Ivoire (2019) ». *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 13, N°1 (2018) 574 - 585
- [10] - S. A. J. M. AL-DAHAAN, M. HUSSAIN, N. AL-ANSARI, S. KNUTSSON, « Hydrochemistry of springs, NAJAF area, IRAQ ». *Journal of Environmental Hydrology*, Vol. 23, N°3 2015 1 - 12
- [11] - A. AYOUBA-MAHAMANE, B. GUEL, « Caractérisations physico-chimiques des eaux souterraines de la localité de Yamtenga (Burkina Faso) ». *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 9, N°1 (2015) 517 - 533
- [12] - F. E. DOVONOU, A. ALASSANE, V. N. ADJAHOSSOU, B. AGBODO, R. DJIBRIL, D. MAMA, « Impacts de l'assainissement autonome sur la qualité des eaux de puits dans la Commune de Sèmè-Podji (Sud-Bénin) ». *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 11, N°6 (2017) 3086 - 3099
- [13] - F. KANOIN, O. B. YAPO, B. DIBI, A. C. BONNY, Caractérisation physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines de Bingerville. *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 11, N°5 (2017) 2495 - 2509

- [14] - R. SOULEY-MOUSSA, M. M. MALAM-ALMA, M. S. LAOUALI, I. NATATOU, I. HABOU, « Caractérisation physico-chimique des eaux des aquifères du Continental Intercalaire / Hamadien et du Continentalsiems Terminal de la région de Zinder (Niger) ». *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 12, N°5 (2018) 2395 - 2411
- [15] - ANONYME, « Atlas des villes ». Ministère d'Etats, Ministère du Plan et du Développement, (2014) 137 p.
- [16] - K. E. AHOUSSE, « 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, (2008) 270 p.
- [17] - A. M. KOUASSI, K. A. YAO, K. E. AHOUSSE, L. C. SEKI, A. YAO, K. I. KOUASSI, J. BIEMI, « Apport des méthodes statistiques et hydrochimiques à la caractérisation des eaux des aquifères fissurés de la région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire) ». *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 4, N°5 (2010) 1816 - 1838
- [18] - S. LALLAHEM, « Structure et modélisation hydrodynamique des eaux souterraines : application à l'aquifère crayeux de la bordure nord du bassin de paris ». Thèse de Doctorat, Université de Lille, France, (2002) 243 p.
- [19] - L. ZOURHI, E. CARLIER, « Caractérisation hydrochimique d'une nappe côtière, Maroc ». *Journal of Environment Hydrology*, Vol. 9, N°4 (2002) 1 - 7
- [20] - F. LALBAT, « Fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère du Miocène du bassin de Carpentras (Vaucluse, France) ». Thèse de Doctorat, Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, France, (2006) 234 p.
- [21] - M. YERMANI, K. ZOUARI, J. L. MICHELOT, A. MAMOU, L. MOUMNI, « Approche géochimique du fonctionnement de la nappe profonde de Gafsa Nord (Tunisie centrale) ». *Journal des Sciences Hydrologiques*, Vol. 48, N°1 (2003) 95 - 108
- [22] - R. A. A. MOHAMMAD, A. E. N. HAMED, « Hydrochemical facies of groundwater in the Gaza Strip, Palestine ». *Journal des Sciences Hydrologiques*, Vol. 49, N°3 (2004) 359 - 371
- [23] - N. TABOUCHE, S. ACHOUR, « Etude de la qualité des eaux souterraines de la région orientale du Sahara septentrional algérien ». *Larhyss Journal*, Vol. 3, (2004) 99 - 113
- [24] - H. ALAYAT, C. LAMOUREUX, « Caractérisation physico-chimique des eaux thermo-minérales des monts de la Cheffia (extrême Nord-Est algérien) ». *La Presse thermale et climatique*, N°144 (2007) 191 - 199
- [25] - L. KOUZANA, A. BEN-MAMMOU, N. GAALOUL, « Intrusion marine et salinisation des eaux d'une nappe phréatique côtière (Korba, Cap-Bon, Tunisie) ». *Geo-Eco-Trop*, N°31 (2007) 57 - 70

- [26] - M. S. OGA, T. LASM, K. T. YAO, N. SORO, M. B. SALEY, D. KOUASSI, F. GNAMBA, « Caractérisation chimique des eaux des aquifères de Fracture : cas de la région de Tiassalé en Côte d'Ivoire ». *European Journal of Scientific Research*, Vol. 31, N°1 (2009) 72 - 87
- [27] - K. A. YAO, A. M. KOUASSI, Y. B. KOFFI, J. BIEMI, «Caractérisation hydrodynamique et hydrogéochimique des aquifères fissurés de la région de Toumodi (Centre de la Côte d'Ivoire) ». *Journal of Environmental Hydrology*, Vol. 18, N°26 (2010) 1 - 15
- [28] - A. MOHAMED, «Caractérisation d'un système aquifère volcanique par approche couplée hydrogéochimique et modélisation numérique. Exemple de l'aquifère des basaltes de Dalha, sud-ouest de la République de Djibouti ». Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, Djibouti, (2012) 220 p.
- [29] - G. SORO, « Évaluation quantitative et qualitative des ressources en eaux 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 Tiebissou ». Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire, (2009) 257 p.
- [30] - A. M. KOUASSI, K. E. AHOUSI, Y. B. KOFFI, A. Y. AKÉ, J. BIÉMI, « Caractérisation hydrogéochimique des eaux des aquifères fissurés de la zone Guiglo-Duekoué (Ouest de la Côte d'Ivoire) ». *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 6, N°1 (2012) 504 - 518
- [31] - A. M. KOUASSI, K. A. YAO, A. Y. AKÉ, J. BIÉMI, « Application des méthodes d'analyses statistiques multivariées à l'étude de la minéralisation des eaux des aquifères fissurés de la zone Guiglo-Duekoué (Ouest de la Côte d'Ivoire) ». *International Journal of Biological and Chemical Sciences*, Vol. 5, N°5 (2011) 2155 - 2169
- [32] - A. HAMIT, « Étude du fonctionnement hydrogéochimique du système aquifère du Chari Baguirmi (République du Tchad) ». Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, UFR des sciences fondamentales et appliquées, Institut de chimie des milieux et matériaux de Poitiers - IC2MP, (2012) 250 p.