

Application des méthodes statistiques multivariées à l'étude hydrochimique des eaux souterraines dans un environnement minier du Centre - Ouest de la Côte d'Ivoire : cas du Département de Divo

Kouassi Serge Aristide YAO* et Kouassi Ernest AHOUSI

Université Félix Houphouët-Boigny de Cocody-Abidjan, UFR des Sciences de la Terre et des Ressources Minières, Laboratoire des Sciences du Sol, de l'Eau et des Géomateriaux (LSSEG), 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire

(Reçu le 30 Novembre 2020 ; Accepté le 20 Avril 2021)

* Correspondance, courriel : yyserge0@gmail.com

Résumé

Dans le but d'évaluer la qualité physico-chimique des eaux souterraines et de donner une explication aux phénomènes, qui sont à l'origine de la minéralisation excessive des eaux souterraines dans le département et d'établir une cartographie de la qualité des eaux des différentes zones de ce département. Une campagne de prélèvement a été effectuée durant la période de septembre 2018, au niveau des points d'eau des différentes aquifères de cette zone. Dans la présente étude, un total de 21 échantillons d'eaux a été prélevés et analysés au laboratoire de l'Institut de Recherche et de Développement (l'IRD) de l'Université Nangui Abrogoua. Treize paramètres ont été analysés : pH, température, turbidité, conductivité, oxygène dissous, calcium, magnésium, sodium, potassium, chlorures, sulfates, bicarbonates et nitrates. Un Système d'Information Géographique (SIG) a été utilisé pour l'élaboration des cartes thématiques. Cette étude a montré que ces eaux sont caractérisées par une faible minéralisation, à l'exception de certains points d'eau situés dans la zone minière de Hiré et d'Agbaou: HP2 (1049 $\mu\text{S}/\text{cm}$) ; KKF (1599 $\mu\text{S}/\text{cm}$) ; GF (1108 $\mu\text{S}/\text{cm}$) ; ZPI (1483 $\mu\text{S}/\text{cm}$) ; AF (1057 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et BRF (1424 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Elle a montré aussi que tous les points étudiés présentent des TDS qui ne dépassent pas les normes de (500 mg/L). Une contamination par les nitrates dans certains puits a également été mise en évidence. Ainsi il a été constaté des valeurs qui varient de 0 à 71,2 mg/L. Certaines valeurs dépassent la norme (50 mg/L). Ces eaux sont fortement caractérisées par un hydrofaciès de type chloruré calcique et magnésien. Les phénomènes à l'origine de la minéralisation des eaux souterraines de Divo sont essentiellement liés aux rejets industriels. Dans l'ensemble, la qualité des eaux souterraines est bonne mais nécessite dans certains cas, un traitement spécifique avant consommation.

Mots-clés : *eaux souterraines, qualité, pollution, minéralisation.*

Abstract

Application of multivariate statistical methods to the hydrochemical study of groundwater in a mining environment of the Central West of the Côte d'Ivoire : case of the Department of Divo

In order to assess the physicochemical quality of groundwater and to give an explanation to the phenomena, which are at the origin of the excessive mineralization of this water in the department and to establish a cartography of the quality of water of different areas of the department. A sampling campaign was carried out during the period of September 2018, at the water points of the various aquifers in this area. In this study, a total of 21 water samples were taken and analyzed at the laboratory of the Institute of Research and Development (IRD) at Nangui Abrogoua University. Thirteen parameters were analyzed : pH, temperature, turbidity, conductivity, dissolved oxygen, calcium, Magnesium, Sodium, Potassium, Chlorides, sulfates, bicarbonates and nitrates. A Geographic Information System (GIS) was used for the development of thematic maps. This study showed that this water is characterized by a weak mineralization, except for certain water points located in the mining zone: HP2 (1049 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$); KKF (1599 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$); GF (1108 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$); ZPI (1483 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$); AF (1057 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) and BRF (1424 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). It also showed that all the studied points present TDS which do not exceed the WHO standards (500 mg / L). This study also highlighted contamination by nitrates in certain wells; we found values which vary from 0 to 71.2 mg / L which exceed the standard (50 mg / L). This water is strongly characterized by a hydrofacies of the calcic and magnesian chlorinated type. The phenomena behind the mineralization of Divo's groundwater are primarily related on the industrial wastes. As a whole, the quality of groundwater is good but requires in certain cases, a specific treatment before consumption.

Keywords : *groundwater, quality, pollution, mineralization.*

1. Introduction

L'eau souterraine est devenue la principale source d'approvisionnement en eau potable, domestique, agricole, industriel et d'autres activités. Cela a conduit à une augmentation de la demande d'approvisionnement en eau qui est rencontré principalement à partir de l'exploitation des ressources en eau souterraines [1, 2]. Des études comme [3 - 11] ont montré que dans de nombreuses villes Africaines, l'eau souterraine est une source d'eau vitale. La gestion des ressources en eau souterraine est fondamentale pour le développement durable de sources d'eau fiables pour les zones urbaines et rurales. En Côte d'Ivoire, comme dans de nombreux pays en développement, l'activité minière contribue à la croissance économique et à l'allègement de la pauvreté par la création d'emploi et les revenus de change [12 - 14]. Les eaux souterraines constituent une ressource vitale lorsqu'il s'agit de faire face aux besoins en eau douce des collectivités. L'utilisation de ces eaux pour les besoins domestiques s'accroît, certes à cause de la poussée démographique, mais aussi à cause de la pollution et du tarissement des eaux de surface. Tous ces facteurs concourent à la diminution de cette ressource naturelle dont la demande se fait toujours plus pressante. En Côte d'Ivoire, comme partout ailleurs en Afrique, les eaux souterraines sont confrontées à un phénomène de pollution d'origine anthropique qui dégrade leur qualité. Les études réalisées par [15, 16], ont fait cas de cette pollution dans les régions d'Abidjan, d'Agboville et de Bonoua situées au Sud de la Côte d'Ivoire. Il ressort de ces travaux que la pollution des nappes fréquemment ressentie au niveau des centres urbains touche aussi les zones rurales de grande ou petite taille. Pour ces auteurs, la dégradation des ressources en eau souterraine est intimement liée aux activités agricoles et à la décomposition de la litière forestière. Selon [17], la mauvaise qualité de l'eau pose un problème de santé public et cause de nombreuses maladies telles que la dysenterie, la fièvre typhoïde, etc. Il devient donc important de connaître leur qualité pour une

utilisation sans risques sanitaires. Dans le département de Divo, vu la forte présence des compagnies minières qui utilisent de manière abondante ces eaux, les difficultés liées à la gestion des eaux souterraines alimentant les différentes localités du département, constituent un problème majeur auquel ces localités doivent faire face. En effet, pendant la saison sèche, bon nombre de puits et forages tarissent ou sont abandonnés à cause de leur apparence rougeâtre et goût désagréable. En milieu urbain comme rural, ces ouvrages sont sous l'influence des effluents domestiques, des activités minières et des engrais agricoles. Par ailleurs, la surexploitation de ces ressources en vue de couvrir les besoins quotidiens en eau, détériore davantage leur qualité. L'objectif de ce travail est d'évaluer la qualité physico-chimique et de déterminer les processus à l'origine de la minéralisation des eaux souterraines du département de Divo.

2. Matériel et méthodes

2-1. Présentation de la zone d'étude

Situé au Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire, le département de Divo est à environ 187 km d'Abidjan, la capitale économique. Il couvre une superficie d'environ 3577 km² et est situé entre les latitudes 05° 40' et 06° 10' Nord et les longitudes 05° 30' et 04° 40' Ouest. Le département compte (07) sous-préfectures dont : la sous-préfecture de Chiépo, d'Hiré, de Zégo, de Didoko, de Nébo, d'Ogoudou et de Divo. Il est limité par le département d'Oumé au nord, le département de Lakota à l'ouest, le département de Grand Lahou au sud-est, le département de Guitry au sud-ouest et le département de Tiassalé à l'est. Il est constitué de trois sous bassins versants : le bassin versant de Bandama, du Gô et le bassin versant de Boubo, avec la présence de deux grandes zones minières à Hiré et à Agbaou. Le département est constitué pour l'essentiel par un socle ancien et pour une petite partie par un bassin sédimentaire côtier. Les formations du socle sont regroupées en trois grands ensembles que sont les formations archéennes (migmatites), les formations libériennes (granitoïdes) et les formations birimiennes (conglomérats, grès et schistes). On note une dominance des formations libériennes et birimiennes (*Figure 1*).

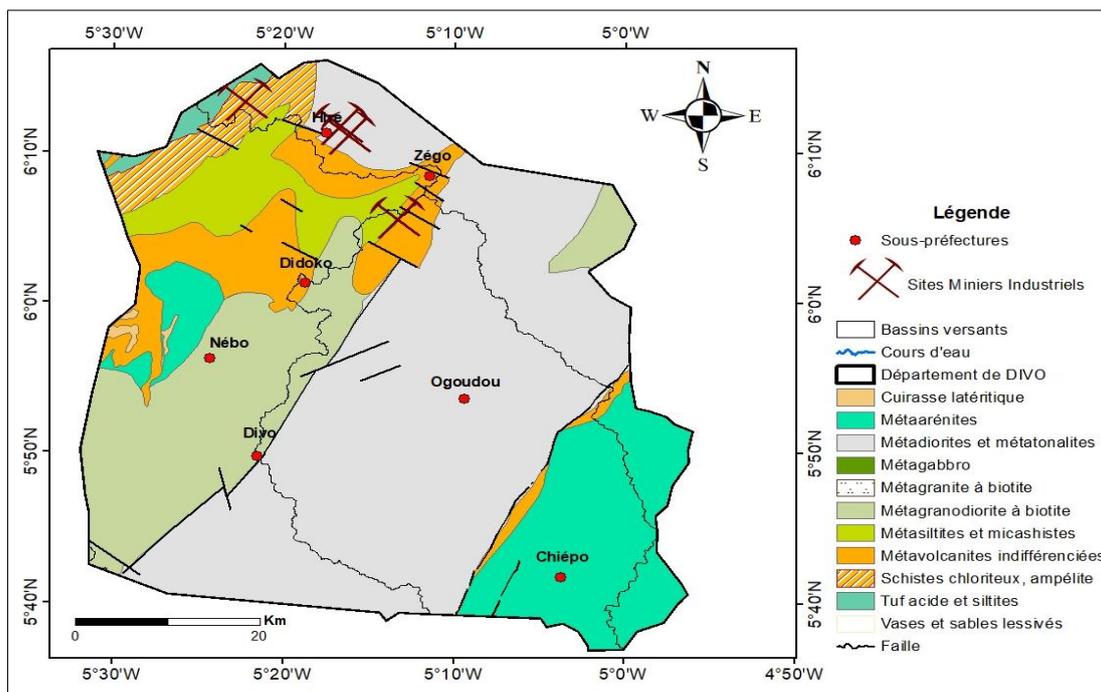


Figure 1 : Carte géologique de la zone d'étude

2-2. Matériel

Le matériel d'échantillonnage des eaux est constitué de :

- un sceau de 5L pour le prélèvement des eaux ;
- 94 flacons de 0,5 L pour le prélèvement des eaux destinées au dosage des ions majeurs ;
- 2 glacières pour la conservation des échantillons ;
- une sonde pour la mesure de la profondeur des puits.

2-3. Méthodes

2-3-1. Méthode d'échantillonnage et d'analyse

Les analyses physico-chimiques ont été effectuées sur les eaux de puits et de forages privés d'usage public recueillant la nappe phréatique du complexe hydrogéologique, y compris un système aquifère composé de plusieurs aquifères superposés à une continuité hydraulique. Les échantillons d'eau prélevés ont été mis dans des bouteilles en polyéthylène de capacité 500 mL, préalablement lavées à l'acide nitrique puis à l'eau distillée. Sur le terrain, avant le remplissage des bouteilles, celles-ci ont été lavées trois fois avec l'eau à prélever. Le remplissage des bouteilles a été fait à ras bord puis le bouchon vissé afin d'éviter tout échange gazeux avec l'atmosphère. Les échantillons d'eau ont été conservés à l'abri de la lumière et de la poussière dans une glacière à 4°C contenant de la glace, puis transportés au laboratoire pour analyse. L'analyse a été rapidement effectuée moins de 24H00 après prélèvement. 12 forages dont 4 d'hydraulique villageoise améliorée (HVA) et 8 d'hydraulique villageoise (HV) ainsi que 9 puits d'eau ont fait l'objet de prélèvement (**Figure 2**). Pour chaque test, les paramètres physiques, à savoir le pH, la turbidité, l'oxygène dissous, la température et la conductivité ont été mesurés *in situ* à l'aide d'un multi-paramètres de type WTW. Les échantillons ont été analysés dans le laboratoire de l'Institut de Recherche et de Développement (IRD) de l'Université Nangui Abrogoua. Ces analyses ont été effectuées à l'aide d'un spectrophotomètre en utilisant les méthodes classiques standardisées. La deuxième approche est basée sur l'utilisation des différentes analyses statistiques classiques (minimum, maximum, moyenne, écart type, coefficient de variation). L'ensemble des données recueillies sur les eaux souterraines du département a fait l'objet de cette étude statistique. L'analyse statistique a été réalisée sur 21 échantillons et 13 variables (conductivité électrique (CE), pH, température (T°C), Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , NO_3^- , Turb, OD et SO_4^{2-} à l'aide du logiciel statistica 7.1. Ces diverses analyses permettent de caractériser les aspects physico-chimiques de l'eau de la nappe phréatique du système aquifère du département de Divo. La spatialisation des points de mesures a été représentée à l'aide du logiciel Arc-Gis 10.5. Les données chimiques ont fait l'objet d'une analyse à l'aide des rapports caractéristiques des masses molaires suivie d'une analyse statistique. C'est un outil statistique simple qui permet de montrer le degré de liaison entre deux variables. Le TDS a été déterminé à l'aide du diagramme de piper. Tout ce traitement a été effectué à l'aide des logiciels Excel 2013 et statistica7.1.

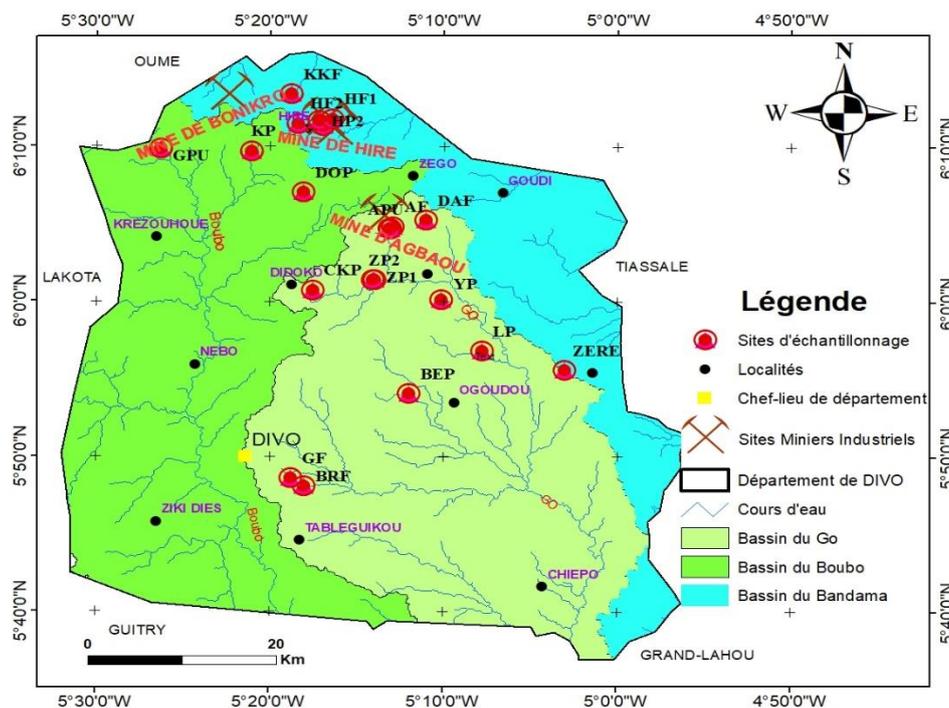


Figure 2 : Carte de répartition des échantillons d'eaux souterraines prélevés

2-3-2. Méthode de traitement des données

2-3-2-1. Caractérisation hydrochimique des eaux

Le traitement des données collectées dans les eaux du département a été réalisé à l'aide de méthodes hydrochimiques et statistiques multivariées. L'étude hydrochimique des eaux a nécessité l'utilisation du diagramme de Piper pour la classification hydrochimique des eaux. Ce diagramme est souvent utilisé dans les études hydrochimiques par plusieurs auteurs dont [18, 19]. Cette technique est couramment utilisée avec de bons résultats dans le domaine de l'hydrochimie en Côte d'Ivoire par des auteurs tels que [20, 21].

2-3-2-2. Traitement statistique des données

L'approche statistique qui a été utilisée pour étudier les phénomènes à l'origine de la minéralisation des eaux est basée sur l'Analyse en Composantes Principales Normées (ACPN). C'est une méthode statistique multidimensionnelle permettant de synthétiser les informations dans le but de comparer les systèmes entre eux. Son application dans l'étude hydrochimique a été réalisée par plusieurs auteurs [22, 23], pour expliquer d'une part les ressemblances chimiques entre les différentes eaux et/ou les différents pôles d'acquisition de la minéralisation et d'autre part les variables qui gouvernent ces mécanismes. L'ACPN a été réalisée sur vingt-un (21) échantillons d'eau souterraine. Cette analyse porte sur 13 paramètres ou variables. L'analyse statistique a été réalisée à l'aide du logiciel STATISTICA 7.1.

3. Résultats

3-1. Salinité et faciès chimique

L'examen des analyses chimiques (*Tableau 1*), montre que le pH varie de 3,97 à 7,87, ce qui indique une faible alcalinité des eaux souterraines. La conductivité électrique (CE) augmente de l'amont vers l'aval, elle

passé de 227 $\mu\text{S}/\text{cm}$, puits dans un village à 1599 $\mu\text{S}/\text{cm}$, eau de forage, nouveau forage moins de 5 ans où la nappe est proche de la surface ce qui la rend plus sensible au phénomène d'évaporation entraînant une concentration des éléments chimiques.

Tableau 1 : Analyse statistique des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines

Paramètres physico-chimiques	Unités	Minimum (M)	Maximum (m)	Moyenne (μ)	Ecart-type (α)	Cv = (α/μ)	Norme OMS (2017)
T	$^{\circ}\text{C}$	26,2	28,9	27,53	0,74	0,02	< 25
pH	Unité pH	3,97	7,87	6,87	0,81	0,12	6,5 < pH < 8,5
CE	$\mu\text{S}/\text{cm}$	227	1599	788,12	397,52	0,50	< 250
Turb	NTU	0,75	11,2	3,78	2,75	0,72	5
Ca^{2+}	mg/L	16	178	68,85	44,32	0,64	100
Na^{+}	mg/L	1,11	50,28	12,05	11,77	0,97	< 200
Mg^{2+}	mg/L	3,4	108,22	39,66	28,4	0,71	< 150
K^{+}	mg/L	0,3	21	9,75	6,2	0,63	< 200
Cl^{-}	mg/L	1,1	24,13	6,22	5,55	0,89	< 200
SO_4^{2-}	mg/L	0	50	17,28	15,88	0,91	< 250
HCO_3^{-}	mg/L	1,6	30	12,36	8,38	0,67	
NO_3^{-}	mg/L	0	71,6	16,69	17,44	1,04	> 50
TDS	mg/L	40	393	168,64	103,70	0,61	500

3-1-1. Conductivité électrique des eaux

La conductivité électrique (CE) renseigne sur le degré de minéralisation d'une eau (**Figure 3**). Les eaux des points contrôlés sont minéralisées avec des valeurs qui oscillent entre 227 et 1599 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (**Tableau 1**). Cependant, cette gamme peut se découper en 3 classes (14 % des eaux) ont une conductivité électrique inférieure à 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, donc sont faiblement minéralisées ; celles ayant une CE comprise entre 400 et 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ représentent 52 % des échantillons, donc moyennement minéralisées ; enfin, 34 % des eaux ont une CE supérieure à 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, donc fortement minéralisées. Ces valeurs importantes peuvent résulter du lessivage des roches, réservoir au sein de laquelle les eaux séjournent.

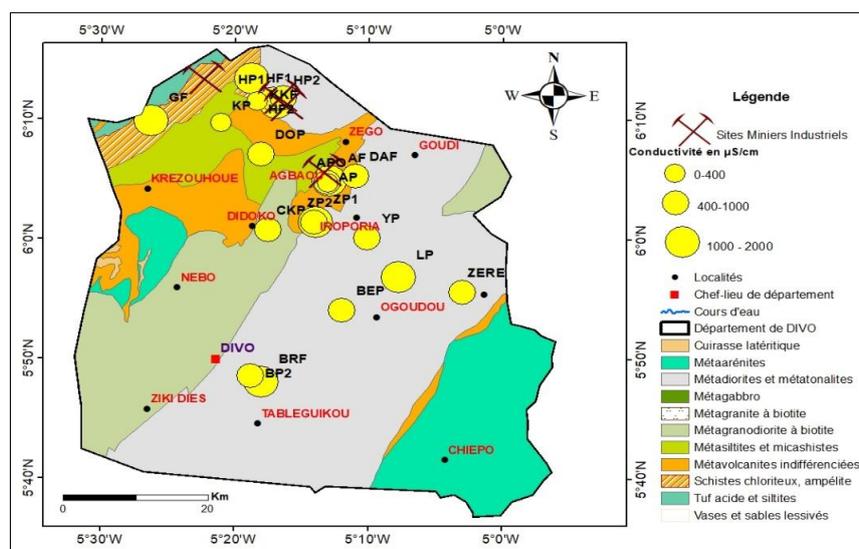


Figure 3 : Répartition spatiale des valeurs de la conductivité électrique (en $\mu\text{S}/\text{cm}$) des eaux souterraines du département de Divo

3-1-2. Total des sels dissous (TDS)

La minéralisation d'une eau correspond à la totalité des sels dissous contenus dans l'eau. Elle est obtenue après évaporation à 180 °C pendant 24 h. Elle varie de 40 à 393 mg/L, avec une valeur moyenne de 168,64 mg/L. Ces résultats montrent que tous les points d'eau ont un TDS inférieur aux normes de l'OMS (500 mg/L) [17]. Les eaux de ce département sont moyennement minéralisées. Le sens d'accroissement de la minéralisation se fait toujours du Nord vers le Sud, ce qui correspond au sens d'écoulement de la nappe. Les points les plus chargés sont constatés dans la partie amont et aval de la nappe, dans les zones minières de Hiré et d'Agbaou et les zones agricoles (**Figure 4**).

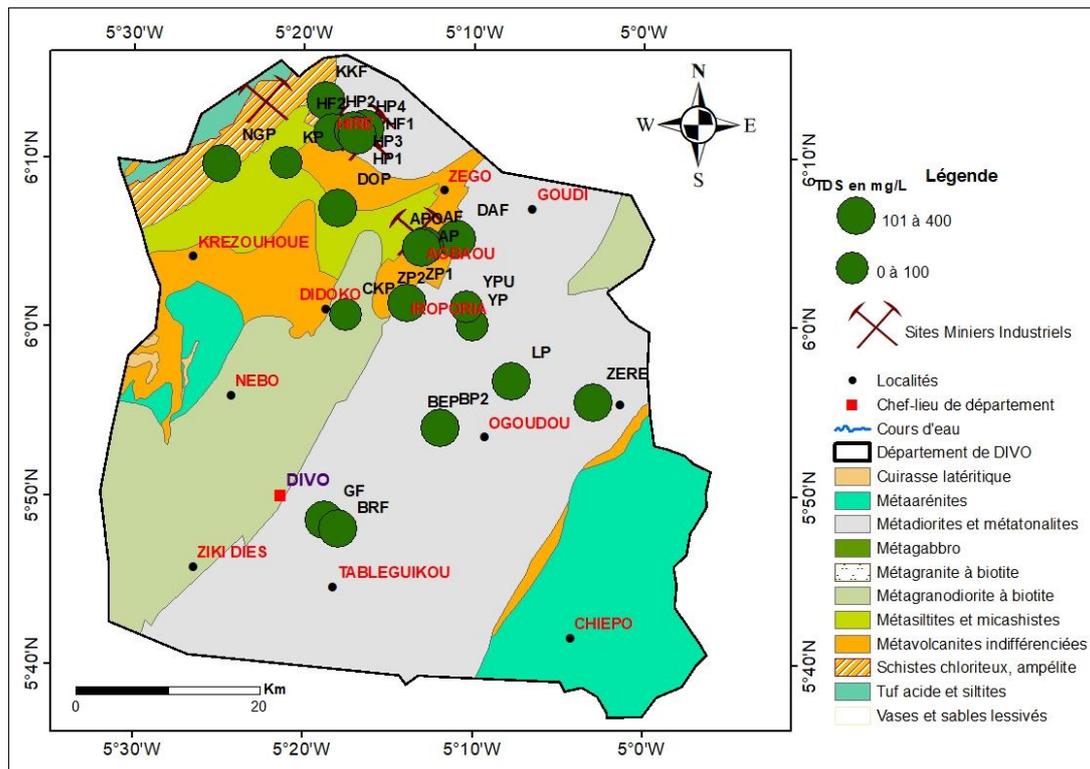


Figure 4 : Carte de répartition du total des sels dissous (TDS) des eaux souterraines du département

3-1-3. Nitrates

Les nitrates sont l'une des principales causes de dégradation de la qualité des eaux souterraines. Ils proviennent essentiellement de pollutions diffuses agricoles. Les rejets industriels, les rejets domestiques et urbains contribuent localement à la contamination des nappes par les nitrates, mais la fertilisation par l'épandage d'engrais chimiques ou organiques azotés en constitue la cause principale. Les nitrates en eux-mêmes ne présentent pas de danger particulier pour la santé. C'est leur transformation en nitrites dans l'estomac qui peut être toxique. Les eaux analysées dans le département montrent que les valeurs des nitrates varient de 0 à 71,6 mg/L, avec une valeur moyenne de 16,69 mg/L (**Tableau 1**). 10 % des eaux analysées ont des valeurs qui dépassent la norme 50 mg/L. 90 % des eaux analysées ont des valeurs inférieures à la norme de 50 mg/L. Les eaux ayant des valeurs de nitrates élevées ont été observées dans les puits situés dans les zones minières du département, puis en aval des bassins versants du département. Cette dégradation semble être due essentiellement à l'activité humaine, la fertilisation azotée des zones agricoles avoisinantes aux points d'eau. La dégradation de la qualité des eaux souterraines dans ce département est d'origine anthropique (**Figure 5**).

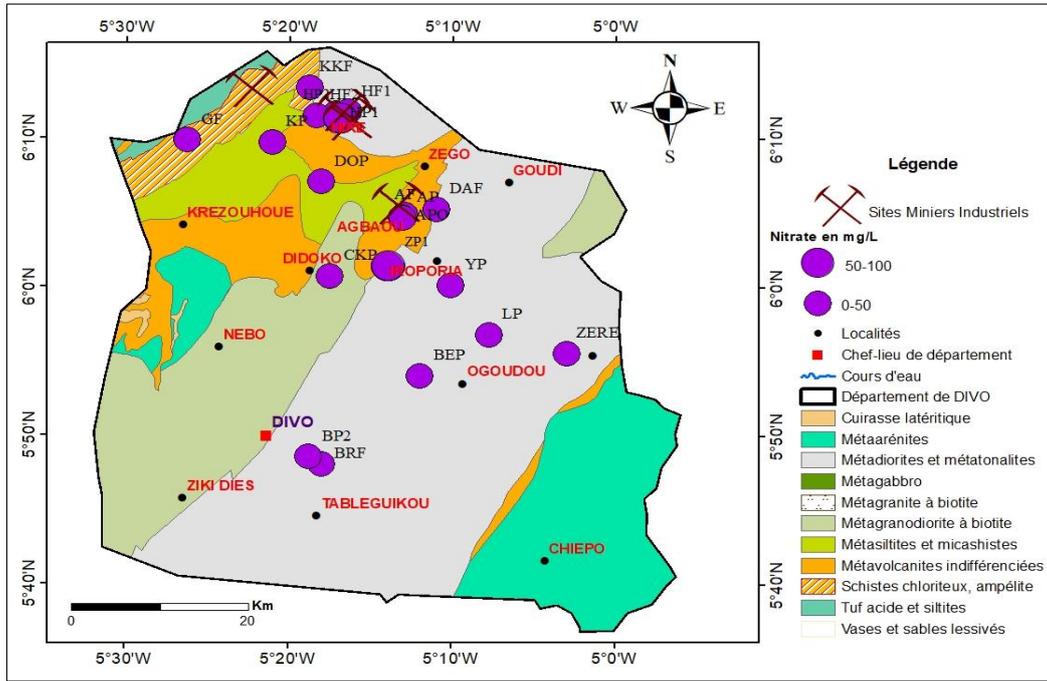


Figure 5 : Carte de répartition du nitrate des eaux souterraines du département de Divo

3-2. Faciès chimique des eaux

La classification hydrochimique des eaux dans le diagramme de Piper (Figure 6) a permis de mettre en évidence un hydrofaciès. Il s'agit des eaux chlorurées calciques et magnésiennes soit 100 % des échantillons d'eau.

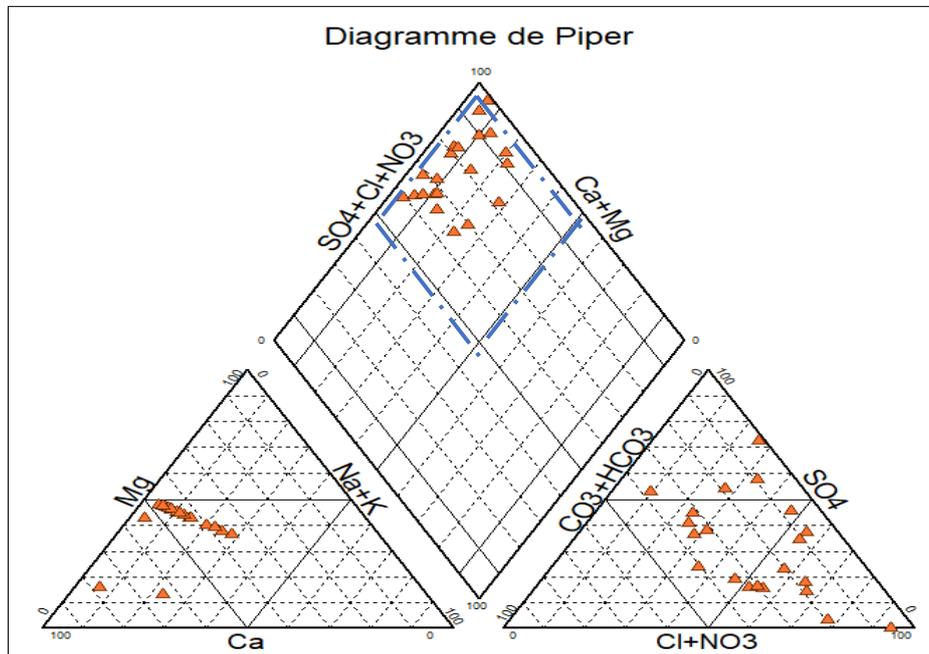


Figure 6 : Projection des eaux souterraines dans le diagramme de Piper

Les eaux de l'aquifère du département de Divo sont caractérisées pour la majorité des cas (87 %), par des rapports compris entre 1 et 2 traduisant une dissolution de la calcite et secondairement (10 %) des minéraux silicatés (terrigenes). (Figure 7). Ceci traduit deux origines possibles du calcium. L'origine de ces éléments

majeurs a été également abordée à l'aide du diagramme $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ vs $SO_4^{2-}+HCO_3^-$. Si les points analytiques s'alignent autour de la droite de pente 1, les réactions dominantes sont dues à la dissolution de la calcite, la dolomite et le gypse. L'échange de base a tendance à déplacer les points vers le bas en raison de l'excès de $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ ou vers le haut en raison de l'excès de $SO_4^{2-} + HCO_3^-$ [25, 26]. Le chimisme de l'eau du département provient en général de la dissolution de la calcite et accessoirement du gypse des formations terrigènes du socle. Néanmoins, on assiste à une légère tendance vers l'échange de base dû à un excès de SO_4^{2-} dans les sédiments terrigènes du département (**Figure 8**).

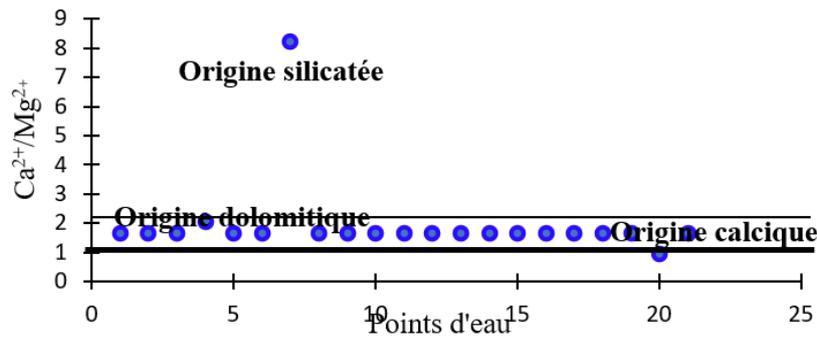


Figure 7 : Origine du calcium dans les eaux de l'aquifère du département

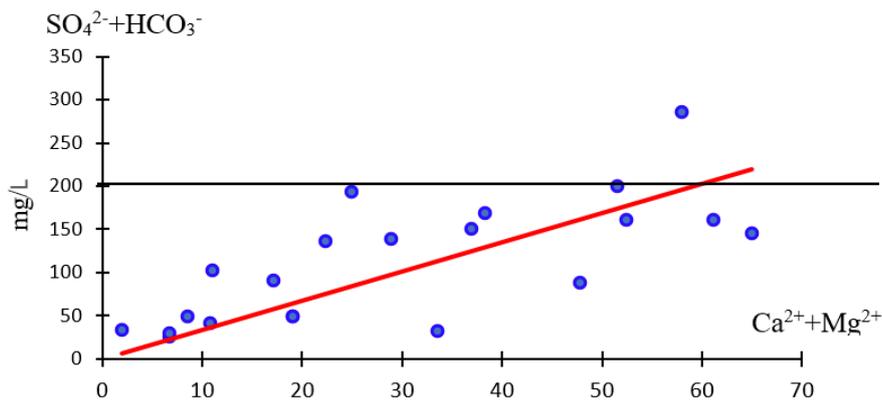


Figure 8 : Relation $SO_4^{2-}+HCO_3^-$ et $Ca^{2+}+Mg^{2+}$ des eaux souterraines du département de Divo

La représentation graphique de Na^+ en fonction de NO_3^- (**Figure 9**) montre une faible corrélation ($R^2 = 0,075$). Cette faible corrélation indique que NO_3^- provient d'une autre origine que celle de Na^+ .

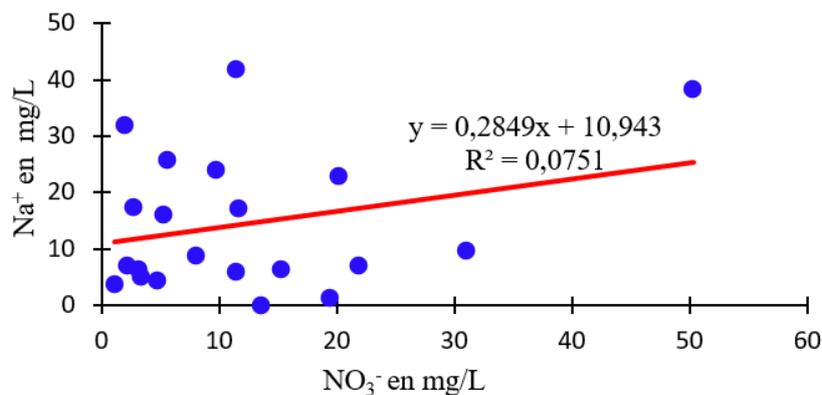


Figure 9 : Evolution de Na^+ en fonction de NO_3^- des eaux souterraines du département de Divo

3-3. Résultats de l'étude statistique multivariée

3-3-1. Analyse en Composantes Principales Normée (ACPN)

Les résultats de l'ACPN donnent de nombreux tableaux dont certains sont résumés ci-dessous. Le **Tableau** des valeurs propres (**Tableau 2**) montre que les trois premiers facteurs représentent 72,62 % de la variance exprimée. Ces facteurs regroupent le maximum de la variance exprimée et sont suffisants pour traduire exactement l'information recherchée.

Tableau 2 : Valeurs propres et pourcentages exprimés par les axes principaux

Facteurs	Val Propre	% Total Variance	Cumul Val Propre	Cumul %
1	5,50	36,66	5,50	36,66
2	2,24	14,93	7,74	51,59
3	3,16	21,04	20,35	72,62

La matrice de corrélation qui présente les différentes corrélations entre les variables nécessaires pour la compréhension des phénomènes étudiés est présentée par le **Tableau 3**.

Tableau 3 : Matrice de corrélation entre les variables

Variables	Turb	O ₂	CE	pH	T	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	NO ₃ ⁻
Turb	1,00												
O ₂	-0,09	1,00											
CE	-0,36	0,34	1,00										
pH	-0,40	0,46	0,43	1,00									
T°C	0,24	-0,15	0,07	-0,31	1,00								
SO ₄ ²⁻	-0,40	0,19	0,79	0,44	-0,15	1,00							
Cl ⁻	-0,17	-0,04	0,37	0,14	-0,13	0,32	1,00						
HCO ₃ ⁻	-0,41	0,05	0,39	0,54	0,08	0,28	0,33	1,00					
Ca ²⁺	-0,51	0,38	0,78	0,66	-0,09	0,58	0,46	0,59	1,00				
K ⁺	-0,52	0,16	0,62	0,48	-0,04	0,34	0,22	0,50	0,71	1,00			
Mg ²⁺	-0,45	0,42	0,78	0,59	-0,10	0,55	0,47	0,48	0,98	0,70	1,00		
Na ⁺	-0,07	0,03	0,34	-0,04	-0,28	0,32	0,89	0,06	0,26	0,09	0,31	1,00	
NO ₃ ⁻	0,11	-0,07	0,36	0,05	0,05	0,44	0,30	-0,03	0,25	0,07	0,29	0,29	1,00

Ce **Tableau** donne les différentes corrélations entre les variables. Il existe une forte corrélation entre CE ; et SO₄²⁻ (0,79) et Mg²⁺ et Ca²⁺ (0,78) ; une forte corrélation entre Ca²⁺ et Mg²⁺ (0,98); Cl⁻ et Na⁺ (0,89) ; assez bonne corrélation entre SO₄²⁻ et Mg²⁺ (0,80) confirmant ainsi que tous ces éléments participent à la minéralisation. Les coefficients de corrélations négatives expriment une opposition entre les variables. Cela signifie que les variables considérées évoluent en sens inverse par rapport au centre.

3-3-2. Analyse dans l'espace des variables du plan factoriel F1-F2

L'espace des variables du plan factoriel F1-F2 (**Figure 10**) met en évidence deux groupements de variables suivant l'axe F1. Le premier groupement est constitué par : la CE, les cations, Mg²⁺ ; Ca²⁺ et K⁺, les anions HCO₃⁻, SO₄²⁻ ainsi que le pH dans sa partie négative. Les ions Ca²⁺ ; K⁺ ; HCO₃⁻ ont la particularité d'apparaître dans l'eau après un contact prolongé de celle-ci avec les roches encaissantes. Par conséquent F1 est lié au temps de séjour de l'eau dans l'aquifère. Le facteur F1 exprime donc la minéralisation temps de séjour des eaux

souterraine. Le facteur F2 représente 14,93 % de la variance exprimée. Il regroupe les paramètre O_2 dans sa partie positive et les paramètres NO_3^- , Na^+ et Cl^- dans sa partie négative. La présence du nitrate (NO_3^-) dans ce groupement a une origine superficielle et témoigne d'une pollution anthropique. En effet, la présence du nitrate dans les eaux souterraines est indicatrice d'une origine superficielle due aux activités anthropiques telles que l'usage des intrants agricoles ou à la déforestation, puis les activités minières. Les nitrates parviennent aux eaux souterraines à partir des eaux de pluies qui s'infiltrent dans le sol. Ainsi, le facteur 2 exprime le phénomène d'origine spatiale et dégradation de la qualité de l'eau.

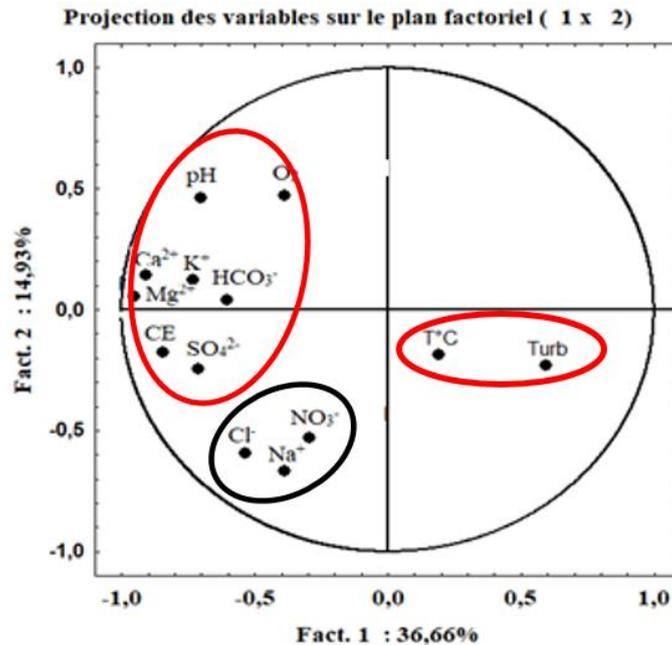


Figure 10 : Analyse dans le plan factoriel F1-F2 des eaux souterraines du département de Divo

3-3-3. Analyse dans l'espace des variables du plan factoriel F1-F3

L'analyse du cercle de communauté indique toujours que le facteur 1 est déterminé par la conductivité électrique, le potassium, le sodium, le magnésium, le calcium, les sulfates, les chlorures et les bicarbonates. La proximité de ces variables dans le cercle de communauté montre qu'elles commandent le phénomène de mise en solution des ions. Ainsi, les éléments qui définissent F1, proviennent d'un processus de mise en solution relativement rapide par conséquent un temps de séjour plus court. Le facteur 1 exprime donc le phénomène de minéralisation lié au temps de séjour. En outre, l'analyse du cercle de communauté révèle que le facteur 3 est déterminé par l'ammonium, le sodium et dans une certaine mesure le nitrate. La présence des nitrates et de l'ammonium dans les eaux étant d'origine anthropique, on en déduit que le facteur 3 est déterminé par la minéralisation d'origine superficielle (Figure 11).

3-3-4. Projection des individus dans le plan factoriel F1-F2

L'étude statistique permet de classer les eaux en trois groupes :

- les eaux très minéralisées : Il s'agit des échantillons des sites KKF (CE 1599 $\mu S/cm$ et HCO_3^- 30 mg/L), HP2, GF, ZP1, AF, LP, BRF ; cette classe représente les eaux de forage ;
- les eaux moyennement minéralisées : Elles sont caractérisées par les échantillons des sites HP1 (CE 616 $\mu S/cm$ et HCO_3^- 6,8 mg/L), ZERE, HF1, DOP, BEP, YP, CKP, BP2, DAF, APO et ZP2 ; cette classe renferme des puits et des pompes ;

- les eaux faiblement minéralisées : elles sont représentées par les échantillons des cours d'eaux KP et AP de conductivité électrique respective 227 et 239 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et de valeur de bicarbonate respective 2 et 4,8 mg/L qui sont les eaux de puits à l'exception du forage HF2.

L'ACPN réalisée a permis de mettre en évidence deux phénomènes : le processus de minéralisation liée au temps de contact eau-roche et le phénomène d'origine anthropique notamment l'activité minière qui a lieu dans la zone d'une part et l'activité agricole d'autre part (*Figure 12*).

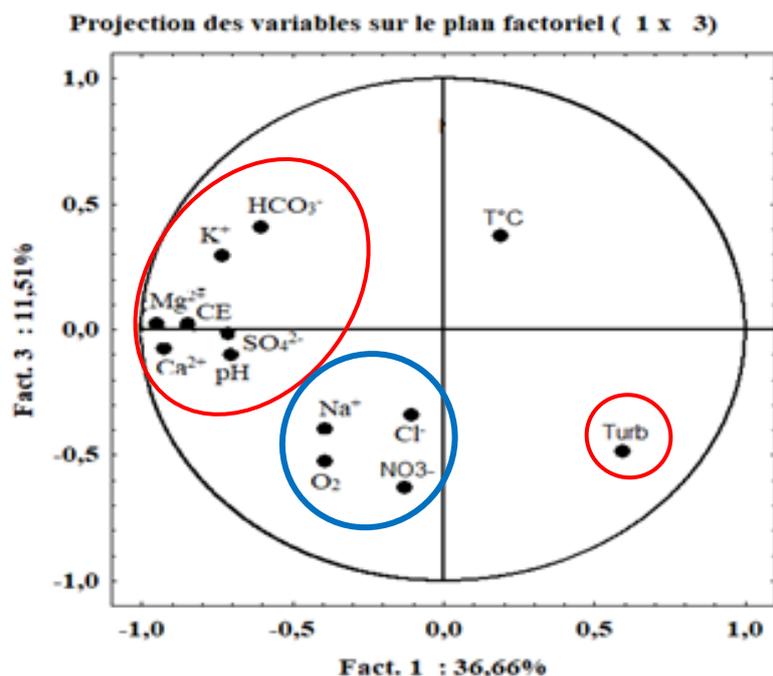


Figure 11 : Analyse dans le plan factoriel F1-F3 des eaux souterraines du département de Divo

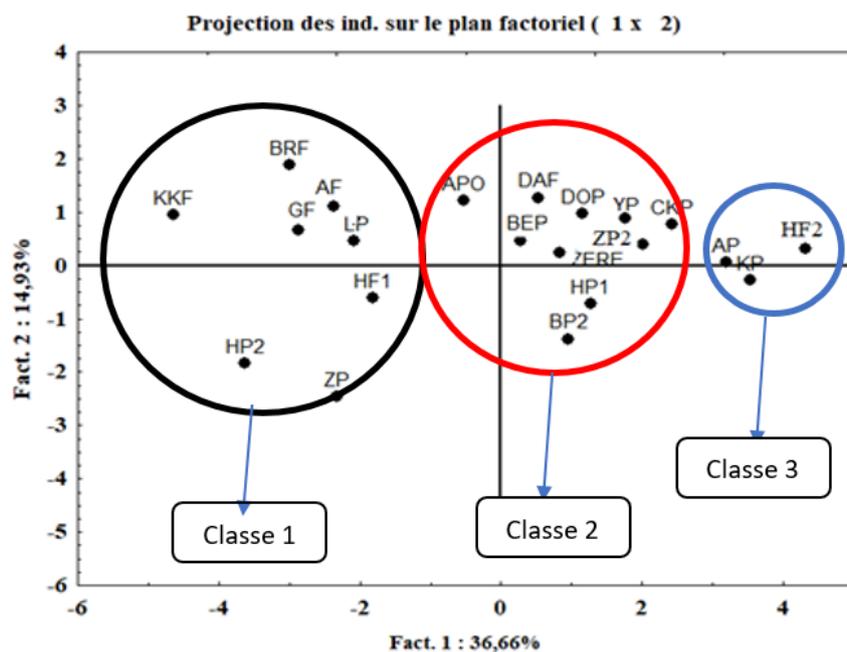
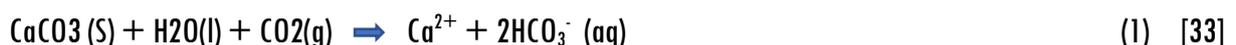


Figure 12 : Espace des unités statistiques du plan factoriel F1 \times F2 des eaux

4. Discussion

Les résultats obtenus lors de la présente étude ont montré que la température varie de 26,2°C à 28,9°C, avec une valeur moyenne de 27,53°C. Cette température est caractéristique des eaux de l'Afrique de l'Ouest sous climat équatorial humide à forte précipitation [24]. Les eaux souterraines sont moins sensibles aux variations de température que les eaux superficielles [25]. Dix-neuf pourcent (19 %) des eaux sont acides (pH < 7), ces eaux sont en grande majorité des eaux de puits captant les altérites. Cette acidité est principalement liée à la production de CO₂ dans les couches superficielles du sol sous l'action de l'activité biologique. Des résultats analogues ont été obtenus dans d'autres régions de socle en Côte d'Ivoire par [26]. La comparaison des concentrations des paramètres physico-chimiques à la directive de [17] pour une eau potable, permet de faire certaines remarques. Les valeurs moyennes (conductivité électrique, pH, sodium, magnésium, potassium, température et chlorures) sont dans les limites préconisées par la directive. Cependant, plusieurs eaux de puits et forages en certains points présentent des concentrations largement au-dessus de la limite préconisée par [17]. Ce sont les nitrates (9,52 %), et la turbidité (33,33 %). Ces résultats indiquent la détérioration de la qualité physico-chimique des eaux. En effet, les travaux de [27] au Maroc et [28] à Madagascar ont respectivement montré que les teneurs élevées de nitrates des eaux de puits et forages témoignent d'une pollution chimique récente et d'origine humaine. Par ailleurs, la consommation de ces eaux pourrait affecter la santé humaine. Ainsi les concentrations anormales de nitrates rencontrées dans certains puits peuvent occasionner la méthémoglobinémie chez le nourrisson et des maladies cancérogènes chez l'adulte [29]. Dans l'ensemble, les eaux sont moyennement acides et faiblement minéralisées, avec une prédominance en ion hydrogénocarbonate (HCO₃⁻) et calcium (Ca²⁺) respectivement à 52 % et 44 %. Cette prédominance est une caractéristique majeure des eaux de socle en milieu cristallin et cristallophyllien. Des travaux effectués dans d'autres régions de la Côte d'Ivoire en milieu de socle notamment dans la région d'Odienné [30] et dans le bassin transfrontalier de la Comoé [31] mettent également en évidence l'importance du faciès hydrogénocarbonate. Par ailleurs, cette minéralisation des eaux est plus prononcée dans les forages que dans les puits. Cette différenciation pourrait traduire un temps de résidence plus prolongé pour les eaux de forages, plus profondes par rapport aux eaux de puits. [32]. En effet, selon [21], la présence des ions calcium et hydrogénocarbonates dans l'eau proviendrait de l'altération des carbonates (CaCO₃) d'après la **Formule** suivante :



L'importance des ions Cl⁻ et NO₃⁻ dans les puits est à relier à une origine anthropique et biogénique. Ces ions proviendraient des effluents domestiques et agricoles, liés aux activités humaines [28]. La position superficielle des réservoirs captés par les puits se traduit également par des valeurs élevées de turbidité qui est une mesure globale qui prend en compte toutes les matières, soit colloïdales, soit insolubles, d'origine minérale ou organique [18]. Ces résultats corroborent avec ceux de [34] et de [17] obtenus dans les eaux souterraines de Poitiers et dans la région de Bondoukou où la source principale de nitrates dans les eaux de puits est attribuable à des activités humaines. Le phénomène est plus sensible dans les puits des localités de Zérédougou et Hiré du bassin du Bandama où les concentrations en nitrates sont supérieures à la directive [17] qui est de 50 mg/L. Ce résultat vient étayer les études antérieures de [35] qui a montré que les eaux souterraines du bassin de Bandama sont influencées par la pollution à cause de la forte pression anthropique. Par ailleurs, les travaux de [15, 16] ont montrés que les eaux souterraines ont atteint un niveau de pollution inquiétant en Côte d'Ivoire et en Afrique en particulier. Concernant les hydrofaciès, les eaux de la zone d'étude appartiennent au faciès chloruré calcique et magnésien. Ce résultat est en accord avec les travaux de [24] réalisés dans le domaine de la chimie des eaux à proximité de la mine d'or d'Afema. L'apport des activités anthropiques dans cette minéralisation a également été mis en évidence dans cette étude à partir de l'analyse statistique multivariée. L'Analyse en Composantes Principales Normée (ACPN) a donné des indications sur

l'origine de la minéralisation des eaux du département. Celle-ci révèle que la minéralisation des eaux est contrôlée par les activités anthropiques menées autour des points d'eau et la nature des formations géologiques présentes dans le département.

5. Conclusion

La présente étude a permis de connaître les caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines du département de Divo. Les résultats montrent que les valeurs du pH partent de l'acidité à la neutralité avec un pH moyen de 6,87. La température moyenne est de 27,53°C. Les eaux sont moyennement à fortement minéralisées avec des conductivités électriques comprises entre 227 et 1599 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Elles contiennent des teneurs élevées en nitrates variant de 0 à 71,6 mg/L, avec une moyenne de $16,59 \pm 17,44$ mg/L. Cette étude des eaux a révélé que 10 % des eaux analysées ont des valeurs de nitrates qui dépassent la norme 50 mg/L. 90 % des eaux analysées ont des valeurs inférieures à la norme. Les eaux de la zone se regroupent en une famille qui est un faciès chlorurés calcique et magnésien. L'Analyse en Composantes Principales Normé (ACPN) a mis en évidence deux phénomènes dans l'acquisition du chimisme des eaux : la minéralisation-temps de séjour au contact des eaux-roches et une minéralisation liée à la pollution par apports superficiels des eaux d'infiltration et de lessivage des sols. Dans l'ensemble, la qualité des eaux souterraines est bonne mais nécessite dans certains cas, un traitement spécifique avant consommation.

Remerciements

Les auteurs remercient le laboratoire mixte international LMI MINERWA, le réseau international AMEED, le Laboratoire des Sciences du Sol, de l'Eau et de Géomatériaux (LSSEG) de l'Université Félix Houphouët Boigny d'Abidjan et le laboratoire d'analyse de l'IRD de l'Université Nangui Abroguo pour l'analyse des données.

Références

- [1] - G. A. DOUAGUI, A. K. S. KOUADIO, O. M. J. MANGOUA, K. A. KOUASSI, B. K. KOUAME et I. SAVANE, "Using specific capacity for assessing of the factors controlling borehole productivity in crystalline bedrock aquifers of N'Zi, Iffou and Moronou régions in the eastern area of Côte d'Ivoire ". *Groundwater for Sustainable Development*, (2019) 9
- [2] - S. SELVA KUMAR, N. CHANDRASEKAR et G. KUMAR, "Hydrogeochemical characteristics and groundwater contamination in therapid urban development areas of Coimbatore, India". *Water Resources and Industry*, (2017) 26 - 33
- [3] - M. G. ATWIA, M. MOHAMED, M. M. ABU-HELEIKA et M. M. EL-HORINY, "Hydrogeochemical and vertical electrical soundings for groundwater investigations, Burg El-Arab area, Northwestern Coast of Egypt". *Journal of African Earth Sciences*, 80 (2013) 8 - 20
- [4] - D. JELLALIA, F. LACHAAL, M. ANDOULSI, T. ZOUAGHI, M. HAMDI et M. BEDIR, "Hydro-geophysical and geochemical investigation of shallow and deep Neogene aquifer systems in HajebLayoun-Jilma-Ouled Asker area, Central Tunisia". *Journal of African. Earth Sciences*, 110 (2013) 227 - 244
- [5] - O. ANOMOHANRAN, "Hydrogeophysical investigation of aquifer properties and lithological strata in Abraka, Nigeria". *Journal of African Earth Sciences*, 102 (2015) 247 - 253

- [6] - U. A. ABU RISHA et TEMAMY AL AMM, "Comparative study of factors controlling the groundwater occurrence in BirKiseiba and Bir El Shab areas, south western desert, Egypt using hydrogeological and geophysical technique". *Journal of African Earth Sciences*, 117 (2016) 183 - 195
- [7] - A. B. ANABA ONANA, J. R. NDAM NGOUPAYOU et J. MVONDO ONDOA, "Analysis of crystalline bedrock aquifer productivity : Case of central region in Cameroon". *Groundwater for Sustainable Development*, 5 (2017) 66 - 74
- [8] - Z. HAJ-AMOR, H. HASHEMI et S. BOURI, "The conséquences of saline irrigation treatments on soil physicochemical characteristics". *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 3 (22) (2018) 2 - 12
- [9] - A. HAMAD, F. BAALI, R. HADJI, H. ZERROUKI, H. BESSER, N. MOKADEM et Y. HAMED, "Hydrogeochemical characterization of water mineralization in Tebessa-Kasserine karst system (Tuniso-Algerian Transboundary basin)". *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 3 (7) (2018) 1 - 15
- [10] - A. UJGHAD, A. BOUABDLI et B. BAGHDAD, "Groundwater quality evaluation in the vicinity of the DraaSfar Mine in Marrakesh, Morocco". *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 4 (12) (2019) 1 - 10
- [11] - E. L. BAGHDADI, M. ZANTAR, I. JOUIDER, A. NADEM et S. MEDAH, "Evaluation of hydrogeochemical quality parameters of groundwater under urban activities. Case of BeniMellal city (Morocco)". *Euro Mediterranean Journal for Environmental Integration*, 4 (6) (2019) 5 - 19
- [12] - G. DAVIS, J. E. TILTON, "Should Developing Countries Resnounce Mining a Perspective on the Debate, Colorado School of Mine, Denver, Colorado, (2020)
- [13] - M. A. P. PEDRO, "Mainstreaming mineral weath in growth and povert reduction strategies". In : ECA Policy Paper, (2004) 1 - 34 p
- [14] - J. A. K. KOUAME, F. JIANG et Y. FENG, "Research on key problems facing Ivory Coast's mining industry", *Donnish J Geol Mining Res*, 1 (12) (2015) 35 - 41
- [15] - O. BLE, G. E. AKE, T. SORO, G. SORO et E. Y. KOUADIO, "Evaluation de la qualité hydrochimique des eaux souterraines de la région de Bonoua. (Sud-Est de la Côte d'Ivoire)". *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 14 (2016) 896 - 907
- [16] - G. E. AKE, B. H. KOUADIO, M. G. ADJA, J. B. ETIEN, K. R. EFFEBI et J. BIEMI, "Cartographie de la vulnérabilité multifactorielle à l'érosion hydrique des sols de la région de Bonoua (Sud-Est de la Côte d'Ivoire)". *Phys. Géol. Rev. Org*, 31 (1) (2012) 157 - 171
- [17] - OMS, "Guidelines to Drinking-water Quality (fourth edition)", (NLM classification : WA 675). OMS, (2017) 564 p.
- [18] - E. BASHIR, S. N. HUDA, S. NASEEM, S. HAMZA et M. KALEEM, "Geochemistry and quality parameters of of Khipro, District Sanghar, Sindh, Pakistan". *Applied Water Science*, 7 (2017) 1645 - 1655 p.
- [19] - R. CIDU, R. BIDDAU et L. FANFANI, "Impact of past ménin activity on the quality of groundwater in SW Sardinia (Italy)". *J. Geoch. Expl*, 100 (2009) 125 - 132
- [20] - J. BIEMI, "Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsahéliens du socle précambrien d'Afrique de l'Ouest : Hydrostructurale, Hydrodynamique, Hydrochimie et Isotopie des aquifères discontinus de sillons et aires granitiques de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire)". Thèse d'État ès Sciences naturelles. Université de Cocody, Abidjan, (1992) 493 p.
- [21] - K. E. AHOUSSE, S. LOKO, M. G. ADJA, T. LASM et J. P. JOURDA, "Étude hydrogéochemie des eaux des aquifères de fractures du socle Paléoprotérozoïque du Nord-Est de la Côte d'Ivoire : Cas de la région de Bondoukou". *Afrique Sciences*, 08 (2012) 51 - 68

- [22] - L. AKATUMBILA, M. MABIALA, A. LUBINI, K. PWEMA et E. A. MUSIBONO, "Contribution à l'évaluation de la qualité physico-chimique de l'eau : cas de la rivière urbaine Gombe de Kinshasa/République Démocratique du Congo". *Larhyss Journal*, N°26 (2016) 7 - 29 p.
- [23] - K. E. AHOUSI, "Évaluation 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.
- [24] - K. A. F. YAO, "Développement d'une méthodologie pour une meilleure évaluation des impacts environnementaux de l'industrie extractive : cas de la mine d'or d' Afema (Sud-est de la Côte d'Ivoire)". Thèse de Doctorat, Université de Montpellier, France, (2018) 210 p.
- [25] - J. RODIER, "L'analyse de l'eau". Ed. Dunod Paris. ISBN, (2009). 978- 2-10054179-9
- [26] - T. LASM, T. K. YAO, Y. M. S. OGA, K. F. KOUAME, P. JOURDA, K. E. KOUADIO et D. BAKA, "Analysis of the physico-chemical characteristics of groundwater in proterozoic land region of the Tiassale area (Southern Côte d'Ivoire)". *European Journal of Scientific Research*, (2008) 526 - 543 p.
- [27] - B. M. ABOU, F. FADIL, M. ELHAJI et M. ZEMZAMI, "Impact anthropique sur la qualité des eaux souterraines du bassin versant de l'oued Taza (Maroc)". *European Scientific Journal*, 10 (5) (2014) 117 - 137
- [28] - S. C. HERIARIVONY, B. RAZANAMPARANY et J. E. RAKOTOMALALA, "Variations spatio-temporelles des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de la commune rurale d'Antanifotsy, Vakinankaratra, Madagascar". *J*, 27 (2016) 239 - 255
- [29] - R. CIDU, R. BIDDAU et L. FANFANI, "Impact of past mining activity on the quality of groundwater in SW Sardinia (Italy)". *J. Geoch. Expl*, (2009) 125 - 132
- [30] - W. F. KOUASSI, J. M. MANGOUA, K. A. KOUASSI, Z. A. KOUADIO, P. H. ALLE et B. T. A. GOULA, "Caractéristiques hydrogéochimiques des aquifères fissurés de la région d'Odienné, Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire". *Afrique. Sciences*, 13 (3) (2017) 30 - 42
- [31] - I. OUATTARA, B. KAMAGATE, A. DAO, D. NOUFE et I. SAVANE, "Processus de minéralisation des eaux souterraines et transfert de flux en milieu de socle fissuré : cas du bassin versant transfrontalier de la Comoé (Côte d'Ivoire, Burkina Faso, Ghana, Mali)", *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 17 (1) (2016) 57 - 69
- [32] - E. BASHIR, S. N. HUDA, S. NASEEM, S. HAMZA et M. KALEEM, "Geochemistry and quality parameters of dug and tube well water of Khipro, District Sanghar, Sindh, Pakistan". *Applied Water Science*, 7 (2017) 1645 - 1655 p.
- [33] - N. G. KOBENAN, J. M. OI MANGOUA, N. K. ABOUA1, A. G. DOUAGUI et L. D. GONE, "Caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines du bassin versant de la Baya, Est Côte d'Ivoire". *International journal of biological and chemical sciences*, 13 (1) (2019) 574 - 585
- [34] - G. P. SHORIEH et M. RAZACK, "Assessment of Groundwater Quality in the Dogger Aquifer of Poitiers, Poitou Charentes". *Journal. Water Resource Protection*, 7 (2015) 171 - 182
- [35] - M. J. MANGOUA, "Évaluation des potentialités et de la vulnérabilité des ressources en eau souterraine des aquifères fissures du bassin versant de la Baya (Est de la Côte d'Ivoire)". Thèse de Doctorat. Université Nangui Abrogoua, Abidjan (Côte d'Ivoire), (2013) 171 p.