

Caractérisation hydrogéochimique de l'aquifère de Samba Dia (Centre-Ouest du Sénégal)

[Hydrogeochemical characterization of the Samba Dia aquifer (Central West Senegal)]

Amadou Sarr¹, Seyni Ndoye², and Serigne Faye¹

¹Université Cheikh Anta Diop, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Géologie, BP 5005 Dakar Fann, Senegal

²Université Cheikh Anta Diop, Ecole Supérieure Polytechnique, Département de Génie Civil, BP 5085 Dakar Fann, Senegal

Copyright © 2022 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: In the Samba Dia area, located in central western Senegal, the Quaternary aquifer is the only one exploited for the population's drinking water needs. The main objective of this study is to update and analyze the hydrochemical data of this aquifer. Physicochemical analyses were carried out on 36 water samples to characterize the groundwater in the aquifer and explain the phenomena behind the mineralization of this water. Interpretation of the hydrochemical data was done using the Piper diagram, multivariate analysis (Factor analysis and Hierarchical cluster analysis (HAC)), base exchange index and Na vs Cl, HCO₃ vs Ca and (Na-Cl) vs [(Ca+Mg) - (HCO₃+SO₄)] relationships. Water-rock interaction (rock dissolution, base exchange processes) is the dominant mechanism for ion acquisition in the groundwater of this aquifer. The other mechanism is related to water inputs by surface infiltration and intrusion of marine and brackish water. The results of the hydrochemical study show that the chemical species that control water salinization are ions Cl, Na, SO₄, Mg, Ca and HCO₃. The hydrochemical facies observed for the groundwater samples are Na-Cl (70%), CaCl₂ (12.22%) and mixed.

KEYWORDS: Hydrogeochemistry, Mineralization processes, Senegal, Samba Dia Aquifer.

RESUME: Dans la zone de Samba Dia, située au centre Ouest du Sénégal, la nappe du Quaternaire est la seule exploitée pour les besoins en eau potable des populations. L'objectif principal de cette étude est de réactualiser et d'analyser les données hydrochimiques de cet aquifère. Des analyses physicochimiques ont été effectuées sur 36 échantillons d'eau pour faire la caractérisation des eaux souterraines de l'aquifère et expliquer les phénomènes à l'origine de la minéralisation de ces eaux. L'interprétation des données hydrochimiques a été faite à l'aide du diagramme de Piper, de l'analyse multivariée (Analyse factorielle et classification hiérarchique ascendante (CHA)), de l'indice des échanges de bases et des relations Na vs Cl, HCO₃ vs Ca et (Na-Cl) vs [(Ca+Mg) - (HCO₃+SO₄)]. L'interaction eau-roche (dissolution de la roche, processus d'échange de base) est le mécanisme dominant dans l'acquisition des ions dans les eaux souterraines de cet aquifère. L'autre mécanisme est lié aux apports d'eaux par infiltration superficielle et intrusion d'eaux marines et saumâtres. Les résultats de l'étude hydrochimique montrent que les espèces chimiques qui contrôlent la salinisation des eaux sont les ions Cl, Na, SO₄, Mg, Ca et HCO₃. Les faciès hydrochimiques observés pour les échantillons d'eau souterraine sont Na-Cl (70%), CaCl₂ (12,22%) et mixtes.

MOTS-CLEFS: Hydrogéochimie, Processus de Minéralisation, Sénégal, Aquifère de Samba Dia.

1 INTRODUCTION

Au Sénégal, l'alimentation en eau potable des populations repose essentiellement sur l'exploitation des eaux souterraines [1], [2]. Cependant, il se trouve que cette ressource est de plus en plus menacée par des phénomènes environnementaux d'une part [3], [4], [1] et par l'intensité des pompages due à la croissance démographique [5] et aux activités humaines variées d'autre part. Dans la zone de Samba Dia située au centre Ouest du pays, l'accès à l'eau est basé essentiellement sur l'exploitation de la nappe du Quaternaire captée par des puits. Cette région est confrontée depuis plusieurs années à une sécheresse persistante entraînant des déficits pluviométriques importants et une disparition des eaux de surface [6], [7], [8], [9], [10]. Cette précarité est d'autant plus marquée que les nappes d'eau douce ont leurs limites adossées à des eaux salées d'une part, et que les prélèvements s'accroissent du fait d'une forte démographie et d'activités maraîchères d'autre part [7], [8], [11], [5]. A ce phénomène, se rajouterait l'impact d'un éventuel biseau salé; du fait de la proximité des eaux de mer à l'ouest et des eaux hypersalées de l'estuaire du Saloum à l'est et au sud. En effet, les remontées d'eau marine dans ces systèmes fluviaux peuvent atteindre des dizaines de kilomètres à l'intérieur des terres pouvant contaminer ainsi les nappes superficielles. Face à ces menaces qui pèsent sur la nappe dans cette zone, des transferts d'eau sont effectués comme ressources supplémentaires à partir des

forages de Tassette [12]. Ce système d'adduction d'eau potable appelé "Noto-Ndiosmone-Palmarin" a atteint ses limites avec l'accroissement de la demande et n'est plus en mesure d'assurer l'approvisionnement en eau de façon permanente. L'exploitation de l'aquifère prend ainsi de l'ampleur et face aux menaces précitées, nous avons envisagé de faire une caractérisation hydrogéochimique de l'aquifère pour la mise en place d'un plan de gestion rationnel et durable de l'exploitation. Cette présente étude vise principalement à appréhender et à mettre à jour les caractéristiques hydrogéochimiques de la nappe de Samba Dia vu que la dernière étude hydrogéologique dans cette zone remonte en 1982 [8]. Il s'agit dès lors de déterminer les faciès chimiques des eaux, d'étudier l'évolution des ions et des paramètres physico-chimiques puis d'essayer de cerner les processus régissant la chimie des eaux souterraines en utilisant une approche statistique multivariée et des diagrammes binaires. Ce travail est structuré en trois grandes parties une présentation de la zone d'étude, la description du matériel ainsi que les modes opératoires et la discussion des résultats obtenus.

2 PRESENTATION DE LA ZONE

2.1 SITUATION GEOGRAPHIQUE ET CLIMATIQUE

La zone de Samba Dia est située dans la commune de Fimela, département de Fatick (Figure 1). Cette zone se situe à 100km au sud de Dakar et marque la frontière entre la petite côte (Mbour) et le Delta du Saloum (Fatick). Elle est située entre les latitudes 14°05' et 14°50' Nord et les longitudes 16°25' et 17°00' Ouest. Le relief est peu marqué et la pente est dirigée vers les zones basses du Saloum [13]. Des talwegs peu profonds de direction NE-SW entaillent les bordures sud-ouest et nord. La limite entre la zone et les tannes (appellation locale des surfaces de terres à efflorescence blanche de sel) se fait souvent par un talus plus ou moins abrupt, donnant à la zone un aspect de plateau avec une altitude des tannes ne dépassant pas 2 à 3m [8].

Du point de vue climatique, la région, comme sur l'ensemble du Sahel, est caractérisée par une sécheresse qui a débuté depuis les années 1969 [9]. Le climat est de type tropical soudano-sahélien, influencé par les courants marins. Ce climat est caractérisé par l'alternance de deux grandes saisons:

- Une saison sèche humide et relativement fraîche (d'Octobre à Juin) pendant laquelle le pays est soumis à l'influence de deux principaux courants atmosphériques (Alizé et Harmattan);
- Une saison des pluies humide de trois à quatre mois (de Juin/Juillet à Septembre) sous l'influence des moussons, durant laquelle les précipitations sont enregistrées sur l'ensemble de la zone.

Les données climatiques obtenues par l'agence météorologique nationale à la station de Fatick de 1988 à 2018 montrent que la pluviométrie annuelle moyenne tourne autour de 600mm. Août et Septembre représentent les mois les plus pluvieux. L'évaporation potentielle moyenne est 2200 mm/an à Fatick et la température moyenne minimale et maximale varie de 20°C à 40°C. L'humidité relative varie de 60 à 95% et est élevée de juillet à octobre.

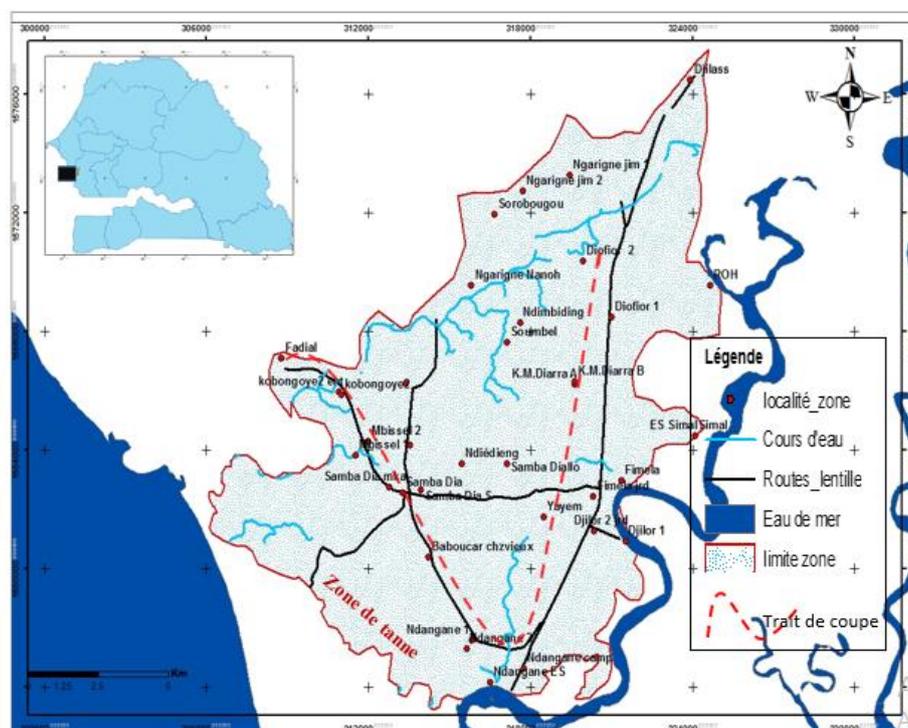


Fig. 1. Localisation de la zone d'étude et ouvrages échantillonnés

2.2 GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE

La région étudiée se situe dans la partie occidentale du bassin sédimentaire Sénégal-Mauritanien et constitue le prolongement de la presqu'île du Cap-Vert au Sud. Les formations sédimentaires qui composent essentiellement le bassin sont: le Maastrichtien, le Paléocène, l'Eocène, le Continental Terminal et le Quaternaire [14], [8]. Dans la zone d'étude, le Maastrichtien est constitué d'argiles et de sables. Les formations carbonatées correspondent aux calcaires d'âge paléocène et éocène (Figure 2) contenant des marnes et des argiles [14], [6], [8]. Des niveaux très variables de terrains détritiques à prédominance argilo-sableuse constituent les couches du Mio-Plio-Quaternaire contenant la nappe de Samba Dia. Cet aquifère de Samba Dia est essentiellement constituée de sable quartzueux du Quaternaire à grains fin à moyen, auxquels s'ajoutent dans une moindre proportion des argiles et des éléments grossiers divers: gravillons ferrugineux, coquilles et galets. La limite inférieure est constituée de marnes et marno-calcaires compact [14], [6], [8] pouvant être argileux dans certains secteurs. La puissance des formations Miocènes et Plio-Quaternaires est comprise en moyenne entre 20 et 30m et est maximale dans la zone à Ndagane culminant à 40m [15], [8]. L'ensemble des ouvrages répertoriés captent l'aquifère du Quaternaire du grand ensemble du Mio-Plio-Quaternaire. Les autres aquifères de l'Eocène, du Paléocène et du Maastrichtien présentent dans la zone sont saumâtres à salées [16], [15] ne présentant pas alors un grand intérêt hydrogéologique ce qui justifie l'absence de forages dans presque toute cette zone. La valeur de la transmissivité sur l'ensemble de la zone est estimée en moyenne à $3,5 \cdot 10^{-3} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$. La porosité efficace est de l'ordre de 22% en moyenne. La moyenne des coefficients de perméabilité répartie sur toute l'étendue de l'aquifère est de l'ordre de $1,80 \cdot 10^{-4} \text{ms}^{-1}$. Ces paramètres hydrodynamiques montrent que l'aquifère de la zone de Samba Dia est très perméable surtout au niveau de sa partie supérieure [8].

3 MATERIEL ET METHODES

Un total de 36 échantillons a été prélevé pour cette étude en mars 2021 dont trois eaux de surface. Les échantillons ont été collectés dans des bouteilles en polypropylène (polymère chimiquement inerte) de 250 ml pour les analyses hydrochimiques. Les flacons sont rincés deux fois avec l'eau déminéralisée, puis trois fois avec l'eau à échantillonner pour éviter toute pollution. Pouvant évoluer après échantillonnage, la conductivité électrique (EC), la température (T°) et le pH ont été mesurés in situ grâce à un appareil portatif multiparamètre WTW 350i. La mesure de la profondeur des eaux dans les ouvrages est faite par une sonde électrique sonore. L'analyse de la composition chimique des eaux prélevées a été faite au laboratoire d'hydrochimie du département de géologie de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar. Les analyses sont effectuées à l'aide de la méthode de chromatographie ionique au moyen d'un équipement AQUION-DIONEX. Les processus d'échange ont été réalisés via les colonnes AS14 A-AERS 500 pour les anions (F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) et CS12 A-CERS 500 pour les cations (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}). Les espèces carbonatées ont été analysées par titrimétrie à l'aide d'une solution d'acide sulfurique 0,05N. Le contrôle de la qualité des données analytiques a été effectué par le calcul de la balance ionique pour chaque échantillon. La valeur trouvée est inférieure à 5%, ce qui atteste de la fiabilité des analyses chimiques effectuées.

Les résultats des analyses physico-chimiques sont traités par des méthodes hydrochimiques (Piper, diagrammes binaires) grâce au logiciel diagramme [17] pour la classification hydrochimique des eaux, couplées à des méthodes d'analyse statistique multivariée pour apprécier les processus de minéralisation. Le logiciel DIAGRAMME est beaucoup utilisé en hydrochimie et a donné des résultats satisfaisants [18], [19], [20], [21], [22]. L'approche statistique multivariée est basée sur l'utilisation de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) pour étudier les phénomènes à l'origine de la minéralisation des eaux, le regroupement des variables et identifier les facteurs responsables de ces regroupements [23]. Ces deux méthodes statistiques sont couramment utilisées dans le domaine des sciences de la Terre, avec d'excellents résultats [24], [25], [26]. L'analyse hiérarchique ascendante est une méthode qui consiste à faire ressortir un critère dit d'agrégation des classes, qui peut être défini par la mesure du degré de ressemblance ou de dissemblance existant entre les échantillons [27]. L'analyse statistique a nécessité l'utilisation du logiciel STATISTICA [28].

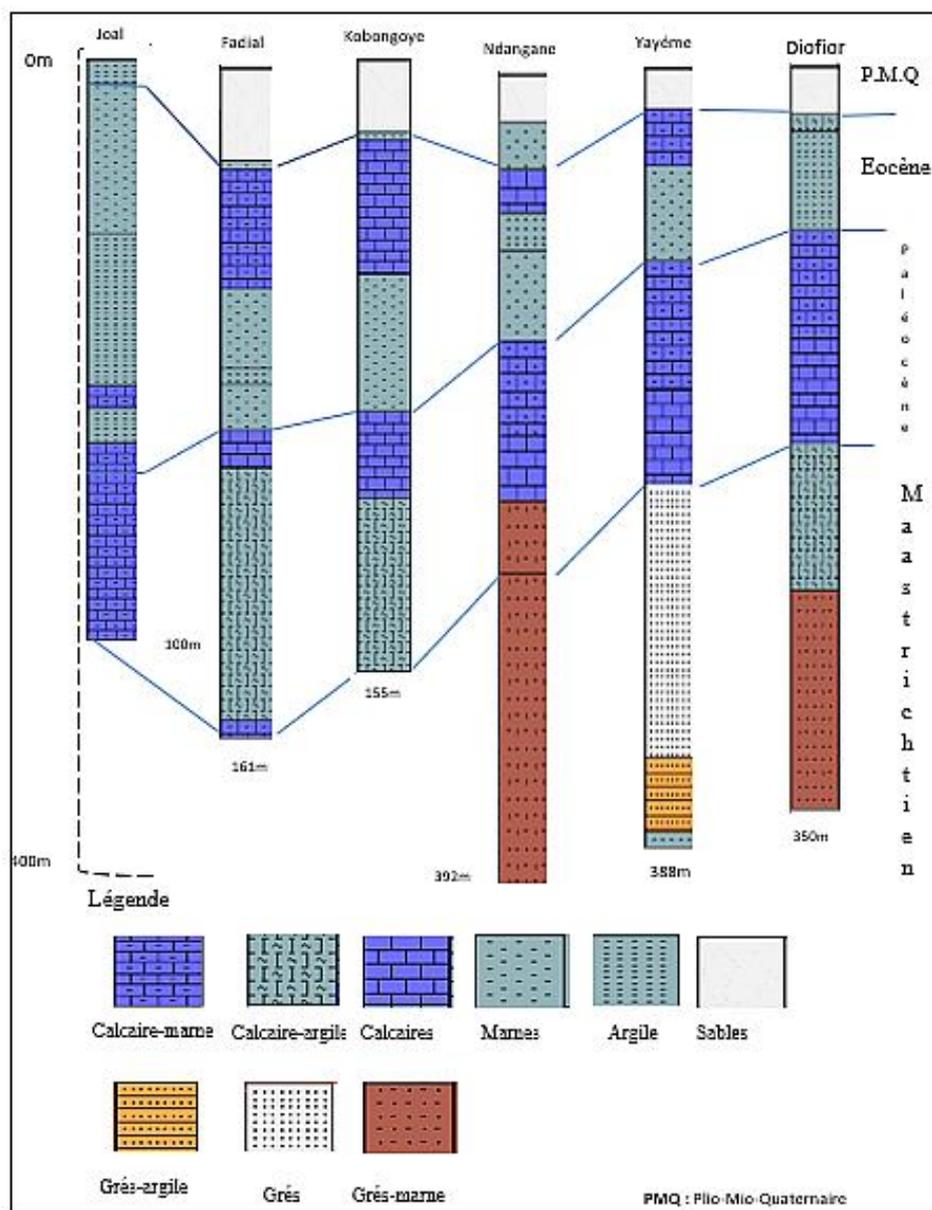


Fig. 2. Logs stratigraphiques dans la zone d'étude de Joal à Diofior (Sarr 1982 in Pitaud 1980) modifiés

4 RESULTATS ET DISCUSSIONS

4.1 PIEZOMETRIE

La morphologie de la surface piézométrique est représentée à la figure 3. Elle est obtenue grâce aux mesures effectuées sur plusieurs ouvrages dont la distribution est relativement homogène sur l'ensemble de la zone. Cette carte montre des courbes isopièzes dont la charge varie entre -6,5m et 4,5m. La piézométrie se caractérise par deux grandes dépressions au Sud-Est à Ndangane et Djilor et à l'Ouest aux environs de Kobongoye séparée par une ligne de partage des eaux passant par le centre de la zone suivant un axe Djilass-Diofior-Keur Moussa Diarra-Samba Diallo-Baboucar (Figure 3). Le gradient hydraulique de la nappe est variable avec les valeurs les moins importantes notées au niveau de cet axe. L'alimentation de la nappe se fait par les eaux de précipitation comme l'atteste la présence de dômes piézométriques dans le secteur nord autour de Diofior et dans le centre vers Samba Diallo. Les lignes de courant indiquent que l'écoulement générale de la nappe se fait du centre de la zone vers les tannes et les secteurs limitrophes.

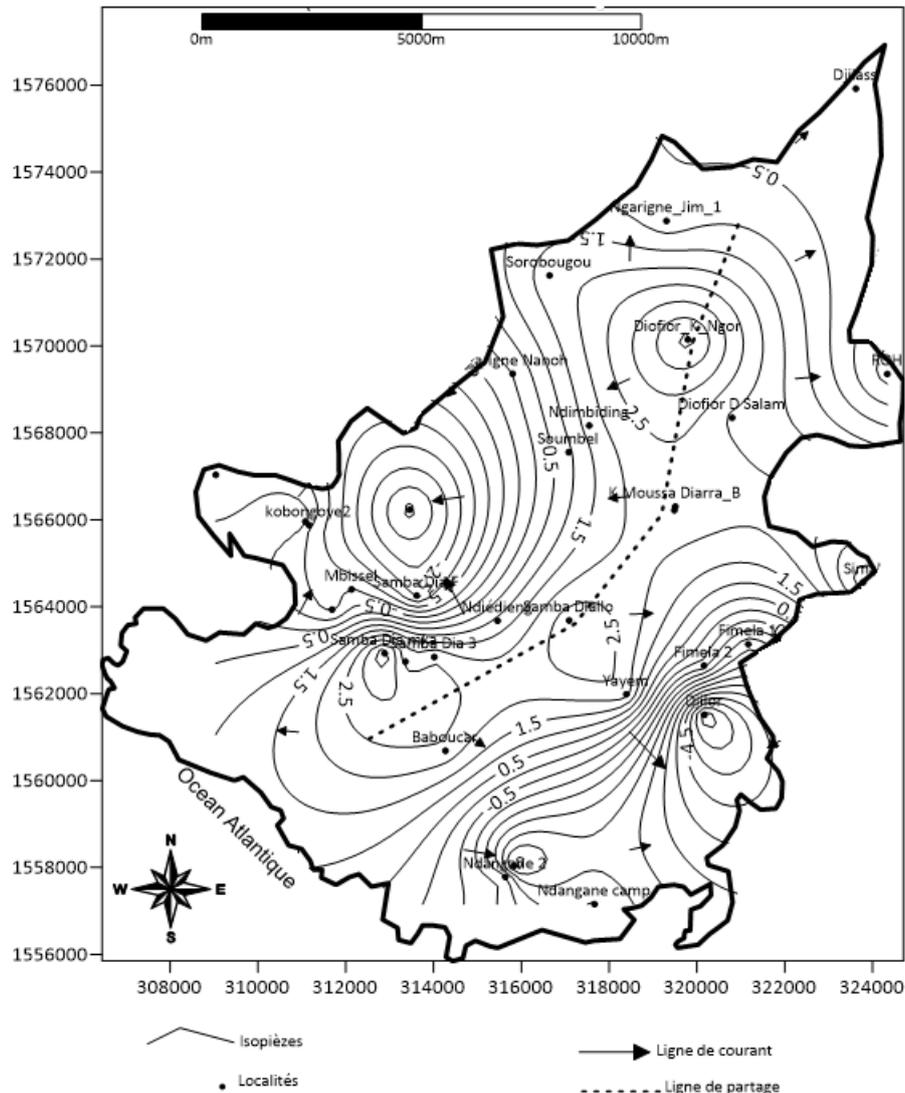


Fig. 3. Carte piézométrique de la nappe en mars 2021

4.2 HYDROGEOCHIMIE

4.2.1 PARAMÈTRES HYDROGÉOCHIMIQUES

Les résultats analytiques des échantillons d'eau souterraine (33) et de surface (3) sont présentés dans le tableau 1. Les mesures statistiques telles que le minimum, le maximum, la moyenne, la médiane et l'écart type des paramètres physicochimiques et chimiques pour les eaux souterraines, sont présentés dans le tableau 2. Les valeurs de pH varient de 4,9 à 8,35 avec une moyenne de 6,96 et une médiane de 7,01 indiquant des eaux acides (21,2%) à légèrement alcalines. La conductivité électrique (CE) varie considérablement de 107,00 μScm^{-1} à Djilor (P10) à 25200,00 μScm^{-1} à Ndangane 2 (P8) avec une moyenne de 1929,78 et une médiane de 850 μScm^{-1} . La conductivité électrique (CE) présente une grande variation entre les valeurs minimale et maximale ainsi qu'un écart type élevé; ce qui révèle une grande hétérogénéité de la chimie des eaux et une influence de plusieurs processus géochimiques. Les valeurs de conductivité les plus élevées sont généralement observées dans les zones limitrophes situées à proximité des tannes (sols salins) comme à Ndangane 2 (P8), Mbissel (P21), Diofior D Salam (P24A), Roh (P25), Djilass (P26). Les valeurs de conductivité sont faibles dans des localités situées dans le centre de la zone d'étude comme à Baboucar (P6), Samba Diallo (P17), K Moussa Diarra (P18A), Ndiédieng (P16). Ces ouvrages qui se trouvent sur l'axe du dôme piézométrique sont sous l'influence de la recharge par les eaux de pluie. Le taux de solides dissous totaux (TDS) varie de 78,00 à 14734,00 mg/L avec une moyenne 1173,36. Les concentrations de cations dans l'eau souterraine varient entre 9,85-4472,21; 5,76-467,71; 0,83-494,96; 0,30-209,71 mg/L pour Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , et K^+ respectivement. L'abondance des cations dans les eaux souterraines suit cet ordre suivant: $\text{Na}^+ \geq \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$. L'anion dominant est le chlorure, suivi du bicarbonate et du sulfate. Les concentrations des anions suivants: Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , F⁻ et Br⁻ se situent respectivement entre 13,0-8184,25; 0,95-556,98; 12,20-439,20; 0,00- 1,44 et 0,00-27,49 mg/L. La concentration en nitrate dans la zone d'étude varie entre 2,86-883,79 mg/L, et huit échantillons (P5, P9, P12, P13, P15, P18B, P24A, P28)

présentent des concentrations élevées en nitrates dépassant largement les limites souhaitables [29], [4], [30]. Ces eaux polluées rencontrées sporadiquement au niveau de ces quelques puits villageois, résultent très probablement d'une contamination locale au droit des points d'eau.

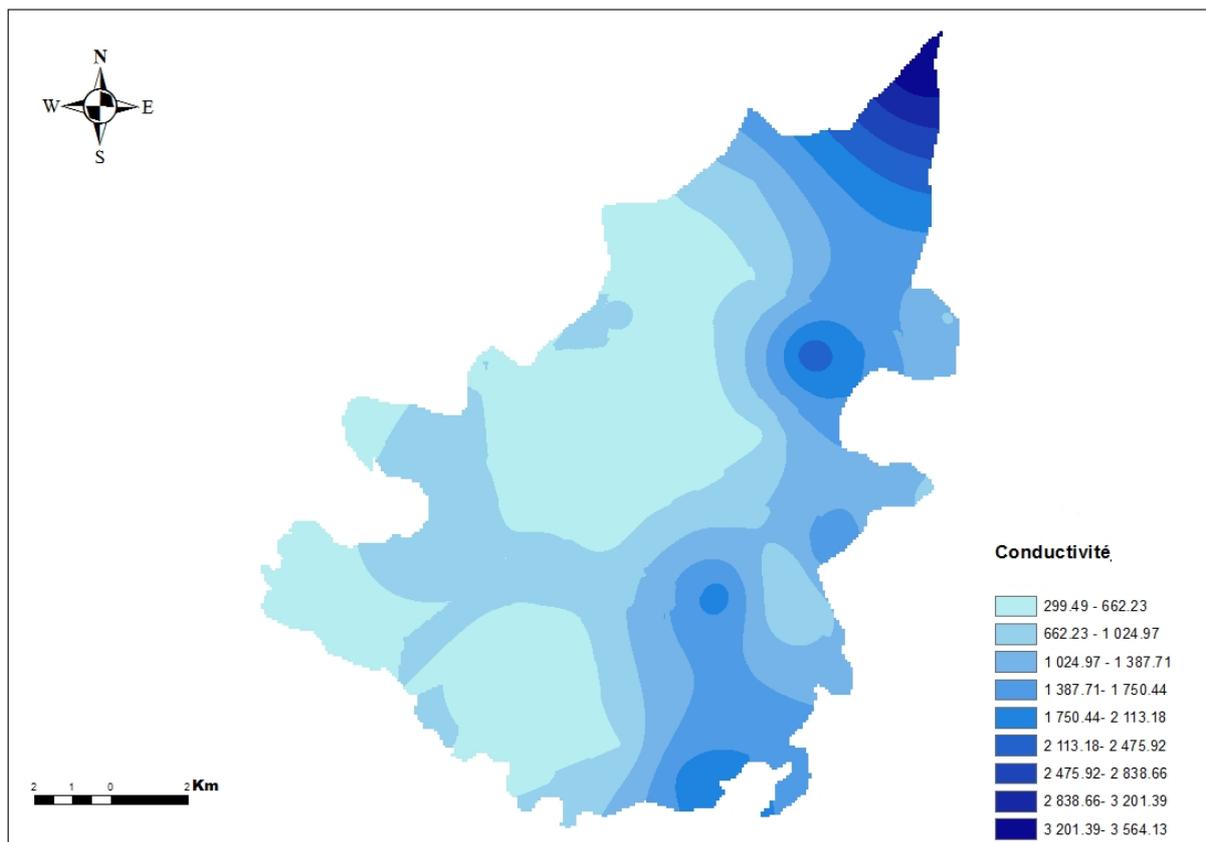
Tableau 1. Résultats des analyses hydrochimiques (en mg/L)

Puits	Nom	T°C	pH	TDS	CE	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	F	Cl	Br	SO ₄	NO ₃	IEB
P1	Kobongoye2_Ent	24,50	7,33	1106	1940	63,75	30,82	281,5	6,16	85,4	0,74	451,30	2,23	127,5	53,91	-0.002
P2	Kobongoye2_S	27,40	6,91	211	366	23,27	2,70	24,77	1,41	48,8	0,00	26,63	0,00	10,23	72,64	-0.526
P3	Kobongoye1	27,70	7,25	193	279	15,32	4,92	35,6	0,77	73,2	0,00	45,78	0,00	8,23	9,38	-0.250
P4	Samba Dia 1	29,80	7,60	286	413	36,40	5,38	34,03	0,45	170,8	0,00	32,04	0,00	2,23	4,14	-0.699
P5	Samba Dia 2	29,10	6,08	712	1115	85,14	17,02	73,27	33,15	42,7	0,78	148,09	1,19	39,78	269	0.006
P6	Baboucar	30,40	7,04	133	175	19,17	1,59	15,69	1,66	73,2	0,00	14,39	0,00	1,62	5,53	-0.838
P7	Ndangane 1	29,70	6,74	170	282	11,54	1,46	34,95	1,87	54,9	0,00	42,43	0,00	2,11	20,57	-0.348
P8	Ndangane 2	29,00	8,12	14734	25200	276,57	494,96	4472	209,7	439,2	1,44	8184,25	27,49	557	11,51	0.109
P9	Ndangane camp	30,10	4,91	1617	2600	95,13	13,64	452,2	22,85	24,4	0,79	670,79	2,65	38,48	291,1	-0.102
P10	Djilor	33,60	5,62	80	107	5,76	0,85	15,12	1,39	18,3	0,00	19,50	0,00	1,40	17,12	-0.297
P11	Simal	30,70	6,62	497	850	28,69	10,88	121,8	10,85	61	0,66	202,49	0,79	32,52	26,57	-0.004
P12	Fimela 1	30,00	6,87	1744	2730	145,94	28,50	349,7	58,33	42,7	0,71	666,17	2,57	121,8	322,4	0.085
P13	Yayem	30,80	5,95	2071	3120	125,11	50,61	331,4	83,16	30,5	0,64	432,89	2,33	114,4	883,8	-0.394
P14	Fimela 2	29,60	5,83	78	108	7,65	0,83	9,85	1,36	15,25	0,00	13,26	0,00	0,95	28,44	-0.275
P15	Samba Dia 3	30,30	6,08	858	1391	64,20	13,41	171,1	4,78	36,6	0,52	279,8	1,24	3,16	281,4	0.013
P16	Ndiédieng	29,40	6,66	106	155	11,32	1,92	15,04	0,70	36,6	0,00	26,68	0,00	1,23	12,33	0.081
P17	Samba Diallo	29,50	6,24	545	880	42,69	5,37	128,2	4,51	45,75	0,7	227,4	0,82	9,79	78,23	0.087
P18A	K Moussa Diarra	28,70	6,95	106	169	10,93	1,13	19,07	0,53	30,5	0,00	39,46	0,00	1,17	2,86	0.221
P18B	K Moussa Diarra	26,40	6,29	3536	5800	460,03	108,27	521,5	45,26	45,75	0,54	1620,42	6,83	50,56	668,6	0.463
P19	Soumbel	27,40	6,60	214	370	18,53	3,57	46,91	2,05	39,65	0,00	75,6	0,00	6,04	20,9	-0.010
P20	Ndimbiding	25,40	6,67	582	995	27,95	5,57	178,5	4,23	30,5	0,47	288,08	1,02	18,39	25,81	0.003
P21	Mbissel	25,00	7,90	547	810	58,69	17,31	70,67	11,4	262,3	0,39	65,3	0,73	57,07	2,99	-0.880
P22	Fadial	28,10	7,30	99	140	14,71	1,41	10,59	1,42	30,5	0,00	22,86	0,00	1,58	16,15	0.207
P23	Samba Dia 4mk	28,80	7,80	299	437	44,14	2,87	34,35	0,41	152,5	0,00	42,58	0,00	14,1	7,99	-0.289
P24A	Diofior D Salam	29,50	7,33	2193	3740	336,08	10,81	417,8	23,92	161,65	0,69	1016,95	4,62	70,41	147,4	0.326
P24B	Diofior 2	27,40	8,35	178	267	19,17	2,62	29,28	1,97	12,2	0,00	38,15	0,00	7,69	58,91	-0.266
P25	ROH	26,10	7,29	452	710	34,52	8,31	107,9	1,38	48,8	0,00	167,5	0,69	17,84	63,9	-0.030
P26	Djillass	27,00	7,24	2684	4410	467,71	18,67	430,7	0,56	219,6	0,69	1368,13	5,49	97,42	71,62	0.500
P27	Ngarigne1	28,50	7,89	560	880	51,80	3,49	113,4	0,78	192,15	0,79	152,53	0,74	21,08	23,06	-0.184
P28	Ngarigne 2	28,40	7,17	539	875	51,87	5,65	118,9	4,6	24,4	0,62	224,44	0,85	8,55	98,43	0.140
P29	Sorobougou	28,90	7,29	133	238	7,46	2,35	28,95	0,3	24,4	0,00	30,71	0,00	5,73	32,98	-0.505
P30	Mbissel bob	26,50	7,84	640	1007	39,78	11,80	139,5	5,82	170,8	0,69	189,2	0,95	41,63	38,23	-0.199
P31	Ngarigne Nanoh	32,50	8,16	818	1124	49,82	18,11	136,9	34,95	359,9	0,71	171,53	1,06	27,87	16,13	-0.457
P32	Ndangane ES	30,50	7,78	38835	69600	552,12	1217,04	12132	411,1	192,15	2,34	21007,6	77,83	3123	11,09	
P33	Djilor_ES	31,00	8,39	46094	81400	383,04	1334,88	14859	452,5	152,5	2,57	25213,9	82,3	3441	8,79	
P34	Simal_ES	35,30	8,46	49685	88600	691,85	1682,70	15305	566,4	152,5	2,78	27485,1	85,17	3521	12,54	

Tableau 2. Statistique descriptive des paramètres physicochimiques et chimiques des eaux souterraines (33 échantillons)

Paramètres	Minimum	Moyenne	Médiane	Maximum	Ecart type
T (°C)	24,50	28,67	28,90	33,60	2,01
pH	4,91	6,97	7,04	8,35	0,80
TDS (mg L ⁻¹)	78,00	1173,36	539,00	14734,00	2574,47
CE (μS cm ⁻¹)	107,00	1929,70	850,00	25200,00	4396,78
Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	5,76	83,36	39,78	467,71	121,88
Mg ²⁺ (mg L ⁻¹)	0,83	27,48	5,570	494,96	86,31
Na ⁺ (mg L ⁻¹)	9,85	271,85	107,85	4472,21	768,52
K ⁺ (mg L ⁻¹)	0,30	17,66	2,05	209,71	39,49
HCO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	12,20	94,09	45,750	439,20	103,05
F ⁻ (mg L ⁻¹)	0,00	0,38	0,470	1,44	0,39
Cl ⁻ (mg L ⁻¹)	13,26	515,07	152,53	8184,25	1430,80
Br ⁻ (mg L ⁻¹)	0,00	1,95	0,74	27,49	4,88
SO ₄ ²⁻ (mg L ⁻¹)	0,95	46,05	14,10	556,98	98,9
NO ₃ ⁻ (mg L ⁻¹)	2,86	111,64	28,44	883,79	195,49

La carte de répartition spatiale des conductivités électriques (Figure 4) montre une augmentation progressive de la minéralisation des eaux vers les tannes et les limites à eaux salées de la nappe; et une présence d'une eau douce dans la zone centre avec une minéralisation faible.

Fig. 4. Carte de répartition de la conductivité électrique (μS cm⁻¹) des eaux de la nappe

Il faut noter cependant sur certains points situés au centre de la zone, on retrouve des ouvrages côte à côte avec des conductivités électriques très différentes en fonction de la profondeur; ce qui fait penser à la présence d'une lame d'eau salée sous l'eau douce (Tableau 3).

Tableau 3. Variation de la conductivité électrique en fonction de la profondeur au niveau d'ouvrages de la même localité dans la zone centre

N°	Localités	Profondeurs	CE (µS/cm)
P18B	Keur Moussa Diarra	4,70	5900
P18A	Keur Moussa Diarra	4,52	149
P24A	Diofior	5,12	3430
P24B	Diofior	2,78	266
P12	Fimela 1	4,88	2390
P14	Fimela 2	3,70	100,7

4.2.2 DIAGRAMME DE PIPER

La représentation des concentrations en éléments majeurs sur le diagramme de Piper [31] montre que les faciès chlorurés sont dominants dans la zone (Figure 5). Les faciès chlorurés sodiques (Na-Cl) représentent 70% des échantillons et ceux chlorurés calciques (Ca-Cl₂) 12,12%.

Les types chlorurés sodiques sont rencontrés au niveau des ouvrages P1, P3, P7, P8A, P8B, P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15, P17, P18A, P19, P20, P24A, P24B, P25, P27, P28, P29, P30. Certains de ces ouvrages sont localisés vers les tannes ou à côté des étangs d'eau salées et présentent une minéralisation très élevée ce qui souligne bien l'influence des eaux salées avec soit l'intrusion saline ou le lessivage des sols salés de surface. Les échantillons présentant un faciès Na-Cl et faiblement minéralisées se trouvant à l'intérieure des terres (P3, P14, P17, P18A, P19, P20, P24B, P29) résulteraient très probablement de processus d'échange de bases où Na remplace graduellement Ca à la surface des minéraux argileux. Les faciès chlorurés calciques sont rencontrés au niveau de P2, P5, P16, P18B, P22, P26. Ce faciès peut provenir d'un processus d'échange ionique inverse de base où il y a enrichissement de la solution en Ca et son appauvrissement en Na quand les argiles sont en contact avec les eaux salées [32]. Le faciès bicarbonaté calcique est rencontré au niveau de quatre ouvrages (P4, P6, P21 et P23) qui se trouvent dans le même secteur. Les faciès bicarbonatés peuvent provenir probablement d'une diffusion du CO₂ atmosphérique avec la faible profondeur de la nappe dans ce secteur ou de la dissolution de la calcite de l'Eocène qui représente le substratum de l'aquifère. Le seul faciès bicarbonaté sodique est rencontré au niveau de l'ouvrage P31.

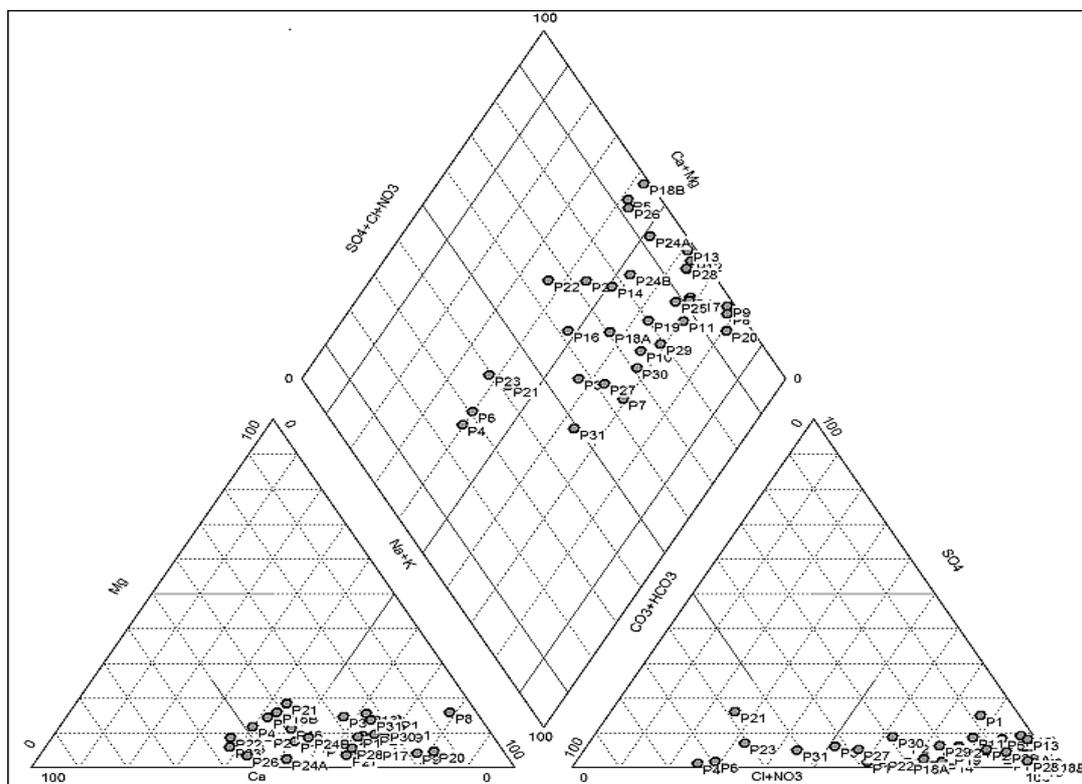


Fig. 5. Diagramme de Piper des analyses d'eau de la nappe de Samba DIA

4.2.3 MATRICE DE CORRELATION ET ANALYSE FACTORIELLE

Comme le diagramme de Piper ne prend en compte que les ions majeurs, voulant étudier la liaison existante entre toutes les variables, une matrice de corrélation est calculée. Cette matrice de corrélation donne la relation existante entre toutes les variables prises deux à deux et les coefficients de corrélation entre ces différentes variables.

Les résultats de l'ACP de 14 paramètres physico-chimiques de 33 analyses d'eau issues de la nappe de la zone d'étude présentés dans le tableau 4 montrent des liaisons de corrélation considérables entre certains paramètres physico-chimiques. Ce tableau montre pour l'essentiel des corrélations fortes et positives. Certains éléments présentent de fortes corrélations tandis que d'autres sont moyennement liés ou de façon faible. La conductivité électrique CE est fortement corrélée avec K (0,92); SO₄ (0,96); Mg (0,98); Na (0,99); Cl (1); TDS (1) et Br (1); moyennement corrélée avec Ca (0,55); F (0,63) et HCO₃ (0,61). L'analyse factorielle des variables chimiques des eaux souterraines a produit trois principaux facteurs F1, F2, F3 (Tableau 5) représentant 86,42% de la variance totale de l'ensemble des données et pouvant expliquer les différents processus contrôlant la minéralisation des eaux. F1, qui explique 64,09% de la variance totale, est déterminé par Cl, Na, SO₄, Mg, K, TDS, Br, Ca, F et HCO₃. L'axe F1 regroupe l'essentiel des éléments responsables de la minéralisation naturelle de l'eau. Cette disposition des variables au tour de F1 implique des origines minérales identiques [33].

L'altération minérale et les interactions eau-roche peuvent être considéré comme les processus dominant dans l'aquifère. Le facteur F2 représente 13,99 % de la variance et il est déterminé par les nitrates (0,83) c'est donc le facteur de la pollution. Les nitrates NO₃ seraient issus de la pollution par l'action anthropique.

Tableau 4. Matrice de corrélation des eaux de la nappe de Samba Dia

	T°C	pH	TDS	CE	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃ -	F	Cl	Br	SO ₄	NO ₃
T°C	1,00													
pH	-0,34	1,00												
TDS	-0,01	0,18	1,00											
CE	-0,01	0,19	1,00	1,00										
Ca	-0,15	0,02	0,56	0,55	1,00									
Mg	-0,01	0,21	0,98	0,98	0,43	1,00								
Na	0,01	0,21	0,99	0,99	0,43	0,99	1,00							
K	0,14	0,10	0,93	0,92	0,44	0,93	0,91	1,00						
HCO ₃	-0,01	<u>0,62</u>	<u>0,61</u>	<u>0,61</u>	0,35	0,59	<u>0,61</u>	0,54	1,00					
F	0,00	0,03	<u>0,64</u>	<u>0,63</u>	0,52	0,56	<u>0,60</u>	<u>0,65</u>	0,51	1,00				
Cl	-0,02	0,20	1,00	1,00	0,52	0,98	0,99	0,90	<u>0,61</u>	<u>0,60</u>	1,00			
Br	-0,03	0,19	1,00	1,00	0,58	0,97	0,98	0,91	<u>0,61</u>	<u>0,64</u>	1,00	1,00		
SO ₄	-0,05	0,24	0,96	0,96	0,46	0,95	0,96	0,93	<u>0,62</u>	<u>0,66</u>	0,95	0,96	1,00	
NO ₃	0,10	-0,46	0,15	0,13	0,44	0,09	0,03	0,34	-0,24	0,31	0,06	0,12	0,11	1,00

Tableau 5. Poids factoriel des Composantes principales et pourcentage de variance exprimé

Paramètres	Factor 1	Factor 2	Factor 3
T°C	-0,020	0,381	0,780
pH	0,234	-0,841	-0,196
TDS	0,993	0,028	0,037
CE	0,992	0,016	0,042
Ca	0,571	0,296	-0,560
Mg	0,969	-0,028	0,118
Na	0,976	-0,050	0,140
K	0,934	0,185	0,137
HCO ₃	0,672	-0,488	-0,007
F	0,698	0,215	-0,201
Cl	0,983	-0,028	0,069
Br	0,991	0,010	0,012
SO ₄	0,972	-0,036	0,038
NO ₃	0,149	0,834	-0,324
% Variance Totale	64,090	13,994	8,341
% Variance cumulative	64,090	78,085	86,426

4.2.4 CLASSIFICATION HIÉRARCHIQUE ASCENDANTE (CHA)

La technique de classification hiérarchique des données hydrogéochimiques [34], [35], [36], [37] est largement appliquée dans les sciences de la Terre [38]. Il existe de nombreuses méthodes par lesquelles les groupes peuvent être créés et liés. Pour cette étude, la distance euclidienne a été choisie comme la mesure de distance, ou mesure de similarité entre les sites d'échantillonnage et la méthode de Ward comme méthode de liaison. Cette combinaison est celle qui en général donne les meilleurs résultats [37], [26].

Cette classification hiérarchique ascendante (CHA) des 14 paramètres physico-chimiques de 33 analyses d'eau fait apparaître deux groupes Gr1 et Gr2 (Figure 6), pouvant être divisés respectivement en deux sous-groupes chacun : Gr1-1 et Gr1-2, puis Gr2-1 et Gr2-2.

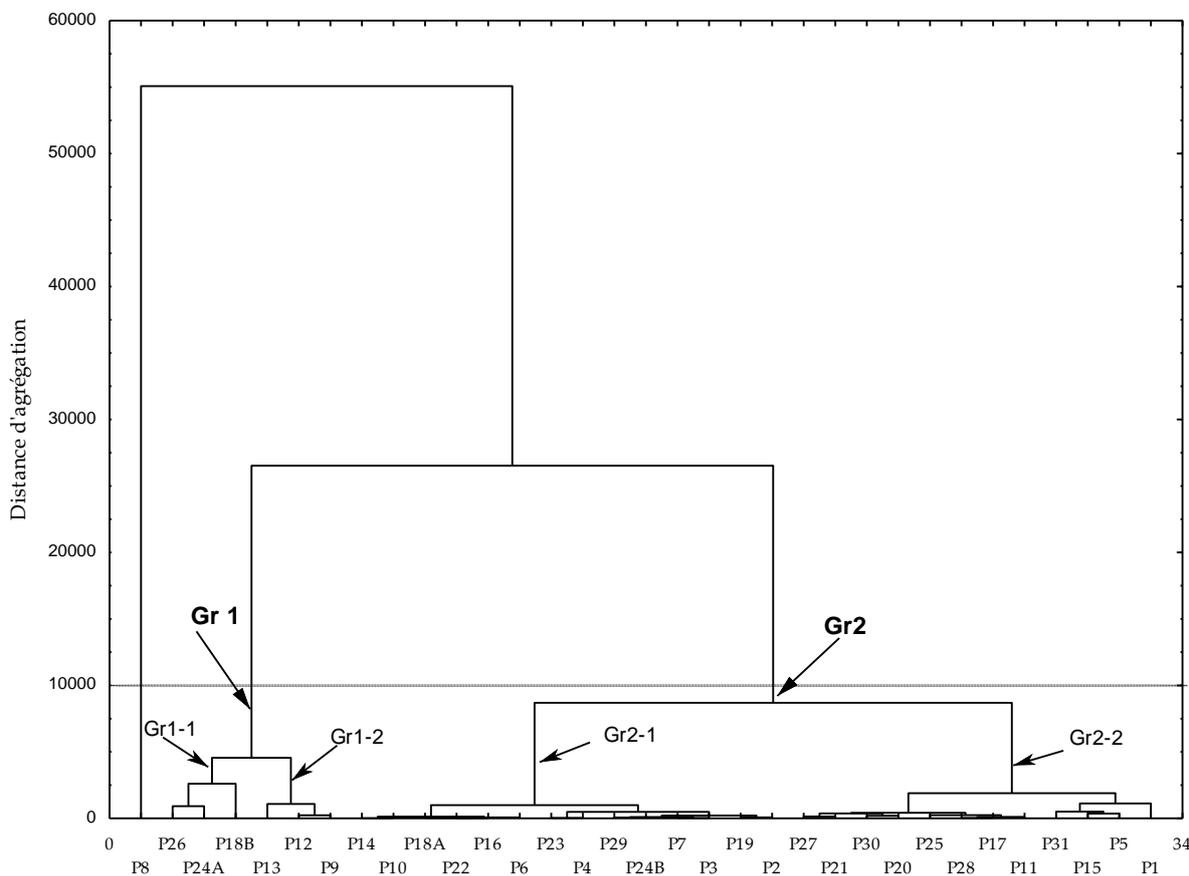


Fig. 6. Arbre de classification hiérarchique des eaux de la nappe de Samba DIA

Le groupe 1 (Gr1) comprend les ouvrages P24A, P26, P18B qui constituent le sous-groupe Gr1-1 et les puits P13, P9, P12, le sous-groupe Gr1-2. Ce groupe représente 18,18% des échantillons d'eau et correspond à deux types de faciès Na-Cl pour le Gr1-1 et Ca-Na-Cl pour le sous-groupe Gr1-2 (Figure 6). Ces eaux sont très minéralisées avec un TDS qui varie entre 1617 et 3536 $\mu\text{S cm}^{-1}$ (Tableau 6). Ces ouvrages sont sous l'influence des étangs d'eau de surface salée et/ou par l'intrusion d'eau marine. Le faciès Ca-Na-Cl pourrait résulter du contact de l'eau de mer avec l'eau douce de la nappe en terrains argileux et d'un échange entre Ca^{2+} adsorbé et le Na^+ en solution [39], [3], [40]. L'apparition du faciès Ca-Cl dans les eaux salées est une indication d'une intrusion saline suivant une proportion de mélange d'au moins de 20% [32], [41]. Le sous-groupe Gr1-2 (CE moyenne: 4650 $\mu\text{S cm}^{-1}$) est plus minéralisé que le sous-groupe Gr1-1 (CE moyenne: 2816,7 $\mu\text{S cm}^{-1}$).

Le groupe 2 (Gr2) comprend l'ensemble des autres ouvrages et est formé de deux sous-groupes (Gr2-1 et Gr2-2) qui représente respectivement 42,42% et 39,4 % des échantillons. Le sous-groupe Gr2-1 correspond aux ouvrages P2, P3, P4, P6, P7, P10, P14, P16, P18A, P19, P22, P23, P24B, P29 qui se trouvent pour l'essentiel dans la zone de recharge au niveau de l'axe central du secteur d'étude. Il est très peu minéralisé avec une conductivité électrique moyenne de 250,43 $\mu\text{S cm}^{-1}$ et définit le faciès Ca-Na- HCO_3 qui semble être en phase avec le résultat d'interactions eau-roche se produisant en zone d'eau diluée [42]. Ce type d'eau émane de processus d'échange de base où l'argile libère le sodium dans l'eau et capte le Ca^{2+} de l'eau d'où sa diminution [40], [43], [44]. Le groupe Gr2-2 est représenté par les ouvrages P1, P5, P11, P15, P17, P20, P21, P25, P27, P28, P30, P31, P34. L'anion dominant des eaux de ce sous-groupe est Cl^- tandis que Na^+ est le cation dominant. La conductivité électrique moyenne pour ce sous-groupe est de 939,57 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ (Tableau 6) ce qui fait que cette famille est caractérisée par une eau normalement minéralisée.

La méthode de CHA montre que l'interaction eau-roche est probablement le principal mécanisme de l'évolution de la chimie des eaux en faisant référence au groupe 2 qui représente 81,82 % des échantillons d'eau. Cette classification montre aussi que le faciès chimique dominant dans cet aquifère est le Na-Cl avec des degrés de minéralisation variable (Figure 7).

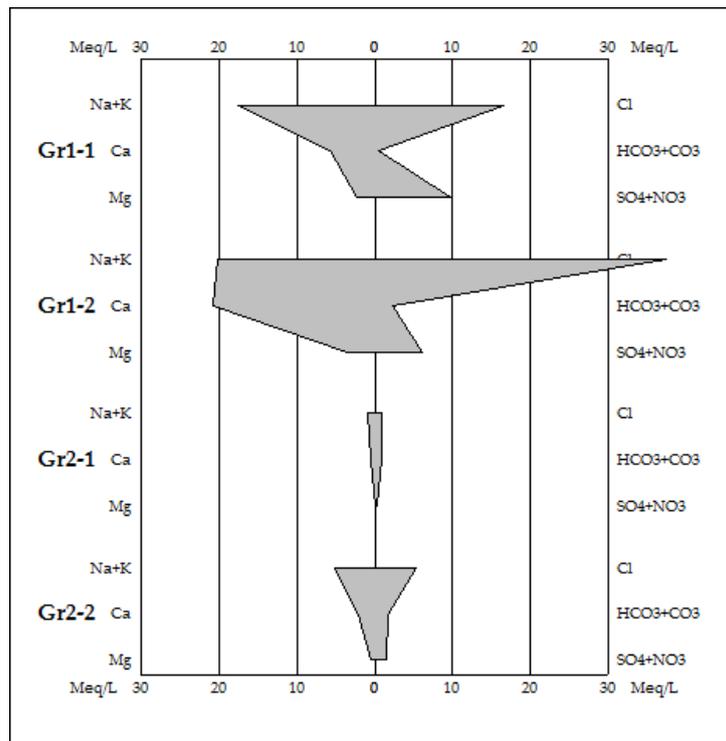


Fig. 7. Faciès chimique des sous-groupes d'eau issus de la CHA

Tableau 6. Valeurs moyennes des paramètres hydrochimiques des quatre sous-groupes d'eaux

Sous-Groupes	pH	TDS	CE	Ca	Mg	Na	K	HCO ₃ ⁻	F	Cl	Br	SO ₄	NO ₃
Gr1-1	5,91	1810,67	2816,67	122,06	30,92	377,76	54,78	32,53	0,71	589,95	2,52	91,56	499,12
Gr1-2	6,95	2804,33	4650,00	421,27	45,92	456,65	23,25	142,33	0,64	1335,17	5,65	72,80	295,86
Gr2-1	7,00	163,29	250,43	17,53	2,40	25,30	1,16	55,77	0,00	33,58	0,00	4,59	22,14
Gr2-2	7,17	589,57	939,57	46,98	10,86	120,46	8,89	110,24	0,64	188,08	1,03	30,06	71,56

4.2.5 L'INDICE D'ÉCHANGE DE BASE

L'indice d'échange de base (IEB) est utilisé pour évaluer l'évolution chimique de l'eau souterraine de la nappe de Samba Dia et spécifiquement pour définir le sens d'échanges ioniques entre l'eau et les roches aquifères [45], [2]. L'expression de l'IEB est la suivante (Equation 1):

$$IEB = \frac{r_{Cl-r} (Na+K)}{r_{Cl}} \quad (\text{Equation 1})$$

Il y a un équilibre entre les compositions chimiques de l'eau et celle du terrain si IEB est nul. Un IEB négatif révèle un échange de Ca²⁺ et Mg²⁺ de l'eau contre K⁺ et Na⁺ de la roche. Les ions Na⁺ et K⁺ de l'eau sont remplacés par les ions Mg²⁺ et Ca²⁺ du matériau rocheux si l'IEB est positif.

Les valeurs d'IEB obtenues montrent que 60 % des points d'eau ont des IEB positifs (Tableau 1). Les eaux échangent donc les ions Na⁺ et K⁺ contre les ions Ca²⁺ et Mg²⁺ de la matrice. Les ouvrages P5, P8, P12, P15, P16, P17, P18A, P18B, P20, P22, P24A, P26, P28 sont rencontrés dans la plupart des cas au niveau de l'axe central de la zone d'étude et présentent des IEB négatifs, où les ions Ca²⁺ et Mg²⁺ des eaux sont échangés contre les ions Na⁺ de la roche réservoir.

4.2.6 DIAGRAMMES BINAIRES

La représentation graphique à charge équivalente de l'évolution des teneurs en sodium en fonction des concentrations en chlorures (Figure 8a) montre que certains points sont situés sur la droite de mélange eau douce-eau salée. Cette figure montre aussi la présence d'eau avec un excès de Na⁺ et un autre type avec un appauvrissement en sodium. Cela implique que l'origine de cet ion ne s'explique pas complètement par un équilibre Na vs Cl. La chimie peut être contrôlée par des réactions d'échange cationique [46], [47]. L'analyse du graphique HCO₃⁻ vs Ca (figure 8b) montre un excès de Ca²⁺ sur beaucoup d'échantillons. Ceci constitue un second argument sur l'implication des processus d'altération des silicates dans la minéralisation des eaux souterraines de la zone d'étude.

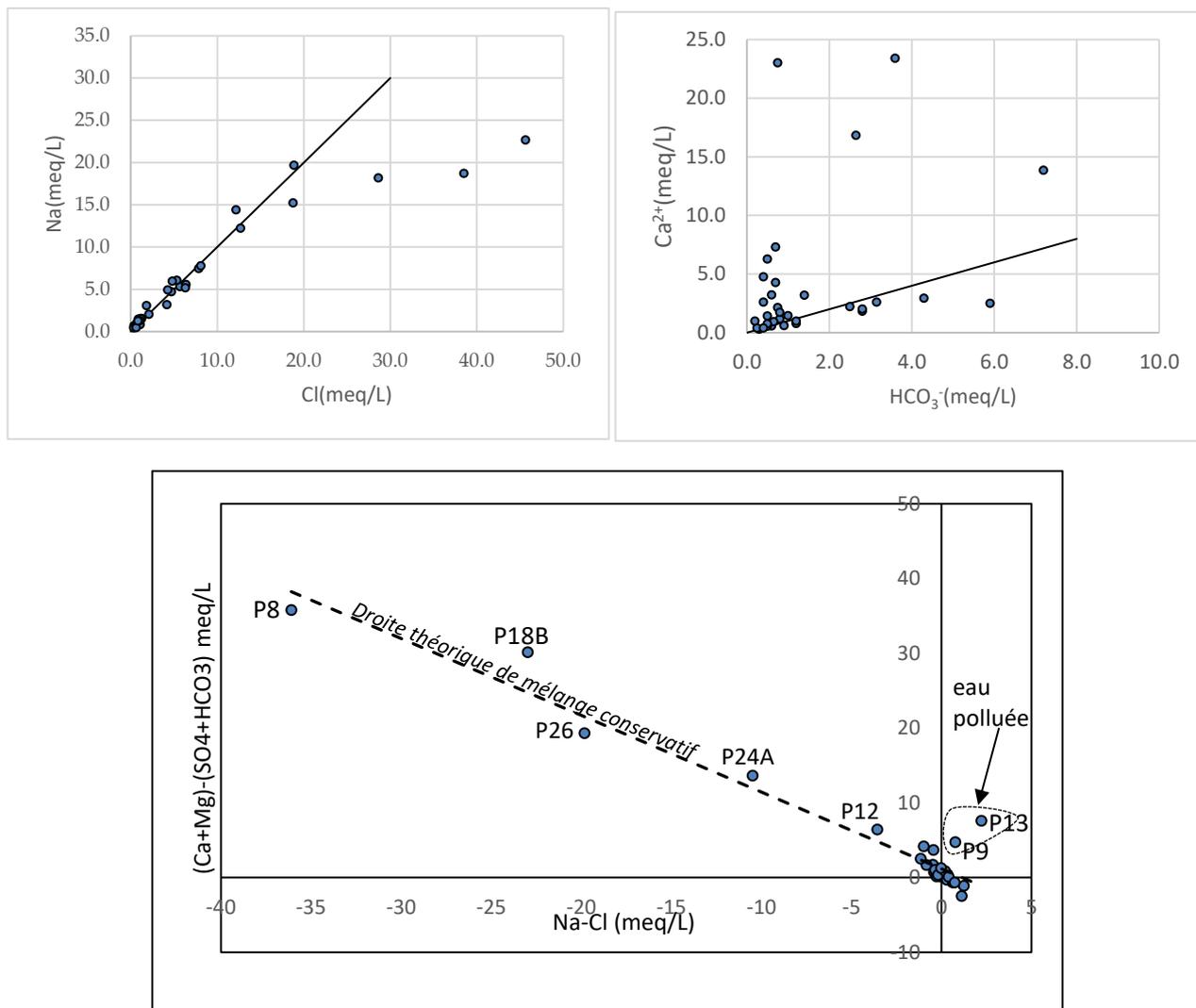


Fig. 8. Diagrammes binaires Na vs Cl (a), Ca vs HCO₃⁻ (b) et [Na-Cl] vs [(Ca+Mg) - (SO₄+HCO₃)] (c)

Dans le but d'expliquer ces différences dans la composition chimique des eaux salées et les réactions géochimiques qui accompagnent l'intrusion saline, le diagramme [(Na-Cl)] vs [(Ca+Mg) - (HCO₃+SO₄)] (Figure 8c) a été construit [48], [49]. Ce diagramme ne met en évidence que les phénomènes d'échange de bases du fait que les apports de solutés par intrusion saline de même que les apports provenant de la dissolution des minéraux (calcite, gypse, dolomite, halite) sont soustraits dans cette relation. Les eaux des puits P8 (Dangane), P26 (Djilass), P18B (K Moussa Diarra), P24A (Diofior D Salam) et P12 (Fimela1) se positionnent très proches de la droite théorique de mélange avec une faible déviation par apport supplémentaire de [Ca+Mg] pour P18B, P24A et P12. Cette observation est concordante avec les processus d'échange inverse de bases [39], [48] où Na remplace Ca au niveau des charges négatives à la surface des minéraux argileux libérant ainsi graduellement Ca dans la solution lors de l'intrusion saline. En dépit de cette déviation et du processus d'échange inverse de bases observés, Na demeure toujours le cation dominant et le faciès Na-Cl demeure inchangé. Les ouvrages P13 et P9 pollués (Figure 8 c) dont les teneurs en nitrates sont respectivement de 883,8 mg/l et 291,1 mg/l constituent avec ces puits situés sur la ligne de mélange, le groupe 1 (figure 6) qui sont des ouvrages rencontrés aux zones limitrophes à eau de surface salées.

5 CONCLUSION

L'étude hydrogéochimique des eaux souterraines de la région de Samba Dia a permis de faire une mise à jour des caractéristiques physicochimiques, des faciès chimiques et des différents processus chimiques de salinisation de la nappe. L'analyse des résultats obtenus montre que les eaux sont légèrement acides à neutre avec des pH qui varient entre 4,9 et 8,4. Des conductivités électriques faibles sont notées au centre la zone correspondant à l'axe du dôme piézométrique. Les plus fortes valeurs de conductivités sont rencontrées au niveau des limites de la zone proche des étangs d'eau salée et des terres à efflorescences blanches de sel appelées localement "tannes". L'origine principale de la minéralisation des eaux est vraisemblablement liée à la dissolution de la roche, à l'échange de base avec les argiles, à l'intrusion des eaux salées et la percolation des eaux de surface saumâtres. Cette hypothèse est justifiée par des valeurs piézométriques négatives, par de fortes concentrations en chlorures et la présence de réactions d'échange cationique inverse, qui sont caractéristiques des mouvements de mélange des eaux de mer avec les eaux douces. L'utilisation du diagramme de Piper montre principalement deux grandes familles; les faciès chlorurés et bicarbonatés. Les résultats de la classification hiérarchique ascendante ont montré l'existence de deux grands groupes scindés en quatre sous-groupes d'eau avec la prédominance de trois types de faciès, Chloruré sodique (Na-Cl), deux faciès mixtes (Ca-Na-HCO₃ et Ca-Na-Cl) et un faciès de type Chloruré calcique Ca-Cl₂. Le faciès NaCl est le dominant avec des degrés de minéralisation variable.

Cette étude montre des résultats intéressants et prône la nécessité de continuer la recherche pour un suivi du processus actuel de salinisation des eaux et l'évaluation de la charge de chlorure dans les zones bordières. Les recherches vont porter sur des investigations notamment isotopique, Chimique et géophysique. Ces travaux permettront de disposer d'une base de données sur la qualité physico-chimique et de faire une modélisation hydrogéologique de l'aquifère pour une meilleure gestion de l'exploitation.

REFERENCES

- [1] M. Diédhiou, S. Cissé Faye, O.C. Diouf, S. Faye and S. Wohnlich, «Groundwater Quality Assessment in a Coastal Sand Aquifer: Implications for Drinking Water and Agricultural Use». *Research Journal of Environmental and Earth Sciences* 8 (5): 585-594, 2014 ISSN: 2040-7459; e-ISSN: 2040-7467 © Maxwell Scientific Organization, 2014.
- [2] S. Ndoye, C. Fontaine, C. B. Gaye, and M. Razack, «Groundwater Quality and Suitability for Different Uses in the Saloum Area of Senegal» *Water* 10, no. 12: 1837. <https://doi.org/10.3390/w10121837>, 2018.
- [3] S. Faye, S. C. Faye, S. Ndoye, A. Faye «Hydrogeochemistry of the Saloum (Senegal) superficial coastal aquifer». *Environ. Geol.* 44, 127–136, 2003.
- [4] V. Re, · S. C. Faye, S. Faye, C. B. Gaye, E. Sacchi, M.Z. Gian, «Water quality decline in coastal aquifers under anthropic pressure: the case of a suburban area of Dakar (Senegal) ». *Environ Monit. Assess*, 172: 605-622 DOI 10.1007/s10661-010-1359-x, 2011.
- [5] ANSD (Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie), Recensement Général de la Population et de l'Habitat, de l'Agriculture et de l'Elevage. Rapport définitif, Ministère de l'Economie, des Finances et du Plan du Sénégal, Dakar, pp 200, 2013.
- [6] Plaud, M., Etude des nappes aquifères superficielles de la région de Joal Fadiouth. *Rapport BRGM Dakar*, 1967.
- [7] Marius, C., Evolution des sols dans deux chrono-séquences de l'estuaire du Saloum (Sénégal). *Rapport ORSTOM Dakar*, juin 1975.
- [8] Sarr R., Etude géologique et hydrogéologique de la région de Joal-Fadiouth (Sénégal). *Thèse 3^{ème} cycle*, Univ. Dakar, 166 p, 1982.
- [9] M. Leroux, «La dynamique de la grande sécheresse sahélienne / *Dynamics of the Great Sahelian Drought*». In: *Revue de géographie de Lyon*, vol. 70, n°3-4, Sahel, la grande sécheresse. pp. 223-232. <https://doi.org/10.3406/geoca.1995.4216>, 1995.
- [10] Gaye, A. T., Sylla, M. B. Scenarios climatiques au Sénégal. Rapport, Laboratoire de Physique de l'atmosphère et de l'océan S F (LPAO-SF), Ecole Supérieure Polytechnique Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal, 2008.
- [11] Travi Y., Origine des fortes teneurs en fluor des eaux souterraines de la nappe paléocène de la région de Mbour (Sénégal): le rôle de l'ion magnésium. *G. R. Acad. Sei. Paris*, 298, II, p. 313-316, 1984.
- [12] ANSD (Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie), Situation Economique et Sociale régionale 2012 -Hydraulique de Fatick. Rapport du Service Régional de la Statistique et de la Démographie de Fatick. Ministère de l'Economie, des Finances du Plan du Sénégal., 62 pages, 2015.
- [13] A.K. Tine, M.I. BA, A.S. Gladima, O.F. Essouli., A. FAYE, B. Sarr, «Réactualisation de la situation Hydrogéologique des aquifères du Maastrichtien et du Paléocène de la Région de Mbour, Sénégal». *Journal des Sciences et Technologies*, Vol. 9 n° 2 pp. 23-32, 2011.
- [14] Tessier, F., Contribution à la stratigraphie et à la Paléontologie de la partie Ouest du Sénégal (Crétacé et Tertiaire). *Thèse es Sciences Nat. Marseille*. TOME 1 228 p, 1950.
- [15] Pitaud, G. Etude hydrogéologique des calcaires paléocènes des calcaires de Mbour. Evaluation des ressources en eau et des possibilités d'exploitation. Ministère de l'équipement du Sénégal, DGER-DEH, Rapport de synthèse, Dakar, 1980.
- [16] Depagne, J., Mossu, H., Notice explicative de la carte hydrogéologique du Sénégal au 1/500000 et de la carte hydrochimique au 1/1000000; BRGM, Dakar, 1967.
- [17] Simler, R., DIAGRAMMES. Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon, Avignon France, 2009.
- [18] K. E. Ahoussi, Y. B. Koffi, A. M. Kouassi, G. Soro, J. Biemi, «Etude hydrochimique et microbiologique des eaux de source de l'ouest montagnoux de la Côte d'Ivoire: Cas du village de Mangouin-Yrongouin». *Journal of Applied Biosciences*, 63, 4703-4719, 2013.

- [19] 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.*, 31, 57-70, 2007.
- [20] S. H. Kolsi, S. Bouri, W. Hachicha, H. B. Dhia, «Implementation and evaluation of multivariate analysis for groundwater hydrochemistry assessment in arid environments: a case study of Hajeb Elyoun–Jelma, Central Tunisia». *Environmental Earth Sciences*, 70, 2215-2224, 2013.
- [21] T. Lasm, R. M. N. Fossou, O.Z. Onetie, D. Baka, T.A.M. Youan, M-S. Oga, N. Soro, «Contribution hydrogéologique à la connaissance des aquifères discontinus du département de Ferké (nord de la côte d'ivoire) pour une meilleure alimentation en eau potable». *Revue Ivoire Sciences et Technologies*, 19, 114-135, 2012.
- [22] M. S. Oga, T. Lasm, T. K. Yao, N. Soro, M. B. Saley, D. Kouassi, F. GNAMBA, «Caractérisation chimique des eaux des aquifères de Fracture: Cas de La Région de Tiassale en Côte d'Ivoire». *European Journal of Scientific Research*, 31 (1): 72-87, 2009.
- [23] Aboubaker, M., Fonctionnement hydrogéochimique et modélisation numérique des écoulements dans l'aquifère des basaltes Dalha, Sud-ouest de la République de Djibouti. *Thèse université de Poitiers*, 212 p, 2012.
- [24] K. E. Ahoussi, N. Soro, G. Soro, T. Lasm, M. S. Oga, S. Zade, «Groundwater Pollution in Africans Biggest Towns: Case of the Town of Abidjan (Côte d'Ivoire) ». *European Journal of Scientific Research*, 20 (2), 302-316, 2008.
- [25] S. M. Yidana, D. Ophori, B. Banoeng-Yakubo, «A multivariate statistical analysis of surface water chemistry data-The Ankobra Basin, Ghana». *Journal of Environmental Management*, 8p, 2006.
- [26] V. Cloutier, R. Lefebvre, R. Therrien, M. M. Savard, «Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydro-geochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system». *Journal of Hydrology*, 353: 294-313, 2008.
- [27] M. Templ, P. Filzmoser, C. Reimann, «Cluster analysis applied to regional geochemical data: Problems and possibilities». *Applied Geochemistry*, 23: 2198–2213, 2008.
- [28] StatSoft Inc., STATISTICA (Data Analysis Software System), version 6. 2300 East, 14th St, Tulsa, OK 74104. 2004.
- [29] G. Gilly, G. Corrao, S. Favilli, «Concentrations of nitrates in drinking water and incidence of gastric carcinomas. First descriptive study of the Piemonte Region», Italy. *Sci Total Environ*, 34, 35-37, 1984.
- [30] M. Diedhiou, S. C. Faye, O.C. Diouf, S. Faye, A. Faye, V. Re, S. Wohnlich, F. Wisotzky, U. Schulte, P. Malosezewski, «Tracing groundwater nitrate sources in the Dakar suburban area: an isotopic multitracer approach». *Hydrol Process* 26: 760-770, 2012.
- [31] Piper, A.M., A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. American Geophysical Union. Transaction, Hydrology, pp. 914-923, 1944.
- [32] K.W.F. Howard and J.W. Lloyd, «Major Ion Characterization of Coastal Saline groundwaters». *Groundwater*, Vol 21, N°4-<https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1983.tb00744.x>, 1983.
- [33] S.G. Eblin, G.M. Soro, A.P. Sombo, N. Aka, O. Kambiré, N. Soro, «Hydrochimie des eaux souterraines de la région D'adiaké (sud-est côtier de la côte d'ivoire) ». *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n°17, pp. 193-214, 2014.
- [34] Steinhorst, R.K. and Williams, R.E., Discrimination des sources d'eau souterraine à l'aide de l'analyse par grappes, de la MANOVA, de l'analyse canonique et de l'analyse discriminante. *Recherche sur les ressources en eau*, 21, 1149-1156, 1985.
- [35] P.P. Schot, and J. Van der Wal, «L'impact humain sur la composition régionale des eaux souterraines par l'intervention dans les modèles d'écoulement naturel et les changements dans l'utilisation des terres», *Journal of Hydrology*, 134, 297-313, 1992.
- [36] L. Ribeiro and M. E. Macedo, «Application of multivariate statistics, trend and cluster analysis to groundwater quality in the Tejo and Sado aquifer». In: *Groundwater quality: Remediation and Protection. Proceedings of the Prague Conference May 1995. IAHS Publ*, N° 225, 39 - 47 p, 1995.
- [37] C. Güler, G. D. Thyne, J. E. Mccray, A. K. Turner, «Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data». *Hydrogeology Journal*, 10, 455 – 474, 2002.
- [38] Davis, J.C., *Statistics and Data Analysis in Geology*. John Wiley & Sons Inc., New York, 1986.
- [39] Appelo, C. A. J., Postma, D., *Geochemistry groundwater and pollution*. Balkema, Rotterdam, the Netherlands, 1993.
- [40] Appelo, C. and Postma, D., *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. 2nd Edition, Balkema, Rotterdam. <http://dx.doi.org/10.1201/9781439833544>, 2005.
- [41] B.M. Hussien and A.S. Faiyad, «Modeling the Hydrogeochemical Processes and Source of Ions in the Groundwater of Aquifers within Kasra-Nukhaib Region (West Iraq) ». *International Journal of Geosciences*, 7, 1156-1181. <http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2016.710087>, 2016.
- [42] Mohsen Ben Alaya, Thouraya Zemni, Ahmed Mamou & Fouad Zargouni, «Acquisition de salinité et qualité des eaux d'une nappe profonde en Tunisie: approche statistique et géochimique», *Hydrological Sciences Journal*, 59: 2, 395-419, DOI: 10.1080/02626667.2013.870663, 2014.
- [43] Lloyd, J.W. and Tellam, J.H. Caraterizacion hidroquimica de las aguas subterraneas en areas costeras (Hydrochemical characterization of groundwater in coastal areas). *Proceedings of International Symposium TIAC'88 (Tecnologia de la Intrusion marina en Acuiferos Costeros)*, Vol 1, Almunecar, Granada, Spain, pp 1-8, June 1988.
- [44] Lazhar Belkhir, Abderrahmane Boudoukha, Lotfi Mouni, Toufik Baouz: «Application of multivariate statistical methods and inverse geochemical modeling for characterization of groundwater - A case study: Ain Azel plain (Algeria) ». *Geoderma* 159, 390-398, 2010.
- [45] Schoeller, H. Les échanges de base dans les eaux souterraines; trois exemples en Tunisie. *Bull. Soc. Geol. Fr.* 4, 389- 420, 1934.
- [46] M.S. Ghebouli, M. Bencheikh Elhocine, «Origine de la salinité des eaux souterraines-Cas des hautes plaines setifiennes (Nord-Est algérien) ». *Sciences and technologie A-N*_28. Decembre, pp 37-46, 2008.

- [47] H. Abderamane, M. Razack, S. Vassolo, «Hydrogeochemical and isotopic characterisation of the Groundwater in the Chari-Baguirmi depression, Republic of Chad.» *Environ. Earth Sci.*, 69, 2337–2350, 2013.
- [48] FAYE S., Apports des outils géochimiques et isotopiques à l'identification des sources de salinité et à l'évaluation du régime d'écoulement de la nappe du Saloum. These es Sciences. Univ. Cheikh Anta Diop de Dakar 153 p., 2005.
- [49] Heng Wang, Xiao-Wei Jiang, Li Wan, Guilin Han, Huaming Guo: «Hydrogeochemical characterization of groundwater flow systems in the discharge area of a river basin». *Journal of Hydrology*, 527, 433–441, 2015.