

Application des méthodes statistiques multivariées et de la classification de Stuyfzand pour la caractérisation des eaux souterraines de l'aquifère côtier du Saloum, Sénégal

Seyni NDOYE^{1*}, Moumtaz RAZACK², Serigne FAYE³ et Cheikh Bécaye GAYE³

¹ *Université Cheikh Anta Diop, Ecole Supérieure Polytechnique, Département de Génie Civil, BP 5085 Dakar Fann, Sénégal*

² *Université de Poitiers, Département d'Hydrogéologie, UMR 7285, 5 Rue Albert Turpain, B8 TSA 51106, 86073 Poitiers Cedex 9, France*

³ *Université Cheikh Anta Diop, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Géologie, BP 5005 Dakar Fann, Sénégal*

* Correspondance, courriel : ndoyeseyni@yahoo.fr

Résumé

Des analyses physicochimiques ont été effectuées sur 65 échantillons d'eau pour faire la caractérisation des eaux souterraines de l'aquifère côtier du Saloum et expliquer les phénomènes à l'origine de la minéralisation de ces eaux. Les résultats obtenus par l'Analyse en Composantes Principales (ACP) montrent que les espèces chimiques qui contrôlent la salinisation des eaux sont les ions Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} et K^+ . L'ACP a mis en évidence deux grands phénomènes dans l'acquisition de la minéralisation des eaux. 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. L'analyse en Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) et la classification de Stuyfzand ont permis d'identifier trois groupes d'eau de compositions chimiques différentes : saumâtre pour 16 % des échantillons, saumâtre-salée pour 8 % et douce pour 76 %. Les faciès chimiques dominant sont le bicarbonaté calcique et le chloruré sodique avec une prédominance de ce dernier.

Mots-clés : *aquifère côtier, analyses statistiques, classification Stuyfzand, Saloum.*

Abstract

Application of multivariate statistical methods and the Stuyfzand classification for characterization of groundwater of the Saloum coastal aquifer, Senegal

Physicochemical analyzes were carried out on 65 water samples to characterize Saloum coastal aquifer groundwater and explain the phenomena leading to water mineralization. The results obtained by PCA indicate that the variables regulating water salinization are the Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ and SO_4^{2-} ions. The Principal Components Analysis method made it possible to show two big phenomena in water mineralization acquisition. The water-rock interaction (rock dissolution, Base Exchange process) is the dominant mechanism in ion acquisition in this aquifer. The other mechanism is linked to surface water inputs by infiltration and

intrusion of saline and brackish water. The Ascending Hierarchical Clustering analysis (AHC) and the Stuyfzand classification made it possible to identify three types of water with different chemical compositions : brackish (Fb) for 16 % of the samples, brackish and salty (Bs) for 8 % and fresh (F) for 76 %. The dominant chemical facies are calcium bicarbonate and sodium chloride with the latter predominating.

Keywords : *costal aquifer, statistical analysis, Stuyfzand classification, Saloum.*

1. Introduction

Pour les pays de l'Afrique sahélienne, et particulièrement pour ceux de la façade atlantique comme le Sénégal, le problème de la ressource en eau est un enjeu capital [1]. Par ailleurs, comme pour beaucoup de pays dans le monde possédant une région côtière, celle-ci est fortement peuplée, notamment dans sa partie sud, de Dakar jusqu'à l'embouchure du fleuve Saloum. Dans cette région Sud-Ouest du Sénégal, les besoins en eau concernent principalement la boisson, les usages domestiques et l'agriculture irriguée. Pour les habitants de ces régions arides et semi-arides [2], les eaux souterraines sont d'une importance particulière pour l'approvisionnement en eau potable. Les ressources actuelles proviennent essentiellement de l'exploitation d'une nappe souterraine, associée aux formations sablo-argileuses du Continental Terminal [2, 3]. La qualité de ces eaux souterraines est de plus en plus détériorée à cause des processus géochimiques naturels et biogéochimiques dans les aquifères ainsi que les activités anthropiques et, dans certains cas, la surexploitation en raison de ressources limitées en eau. Et, à l'échelle de plusieurs décennies, des travaux et études d'impact ont montré que cette détérioration de la qualité devient quasiment irréversible [4]. Le but de notre travail est donc de contribuer à comprendre l'origine de la salinisation des eaux souterraines du Saloum et l'extension spatiale de cette salinisation en utilisant des techniques d'analyse statistique multivariée et méthode hydrochimique (classification de Stuyfzand).

2. Matériel et méthodes

2-1. Présentation de la zone d'étude

2-1-1. Présentation géographique et climatique

La zone d'étude (**Figure 1**) est située dans le centre-ouest du Sénégal et s'inscrit dans un quadrilatère ($13^{\circ}35'$ à $14^{\circ}10'$ de latitude Nord et $15^{\circ}40'$ à $16^{\circ}30'$ de longitude Ouest) qui couvre une superficie d'environ 5000 km². Ses limites sont l'Océan Atlantique à l'Ouest, le fleuve Saloum au Nord, le réseau hydrographique du Baobolon à l'Est et la Gambie au Sud. Cette zone du Saloum est sous la dépendance d'un climat soudano-sahélien caractérisé par l'alternance d'une longue saison sèche (7 à 9 mois) et d'une saison pluvieuse courte (3 à 5 mois). La saison des pluies s'installe aux mois de juin ou juillet et s'achève en octobre. Les précipitations moyennes annuelles sont comprises entre 600 et 800 mm et les températures moyennes entre 18°C en décembre et 32°C en mai. Le régime des vents est sous la dominance des alizés. En saison sèche, les vents secs continentaux viennent du Nord-Est et pendant la saison des pluies, les vents humides du Sud-Ouest amènent un régime de mousson [5]. La vitesse moyenne des vents croît régulièrement de novembre à avril, passant de 2 à 3 m s⁻¹.

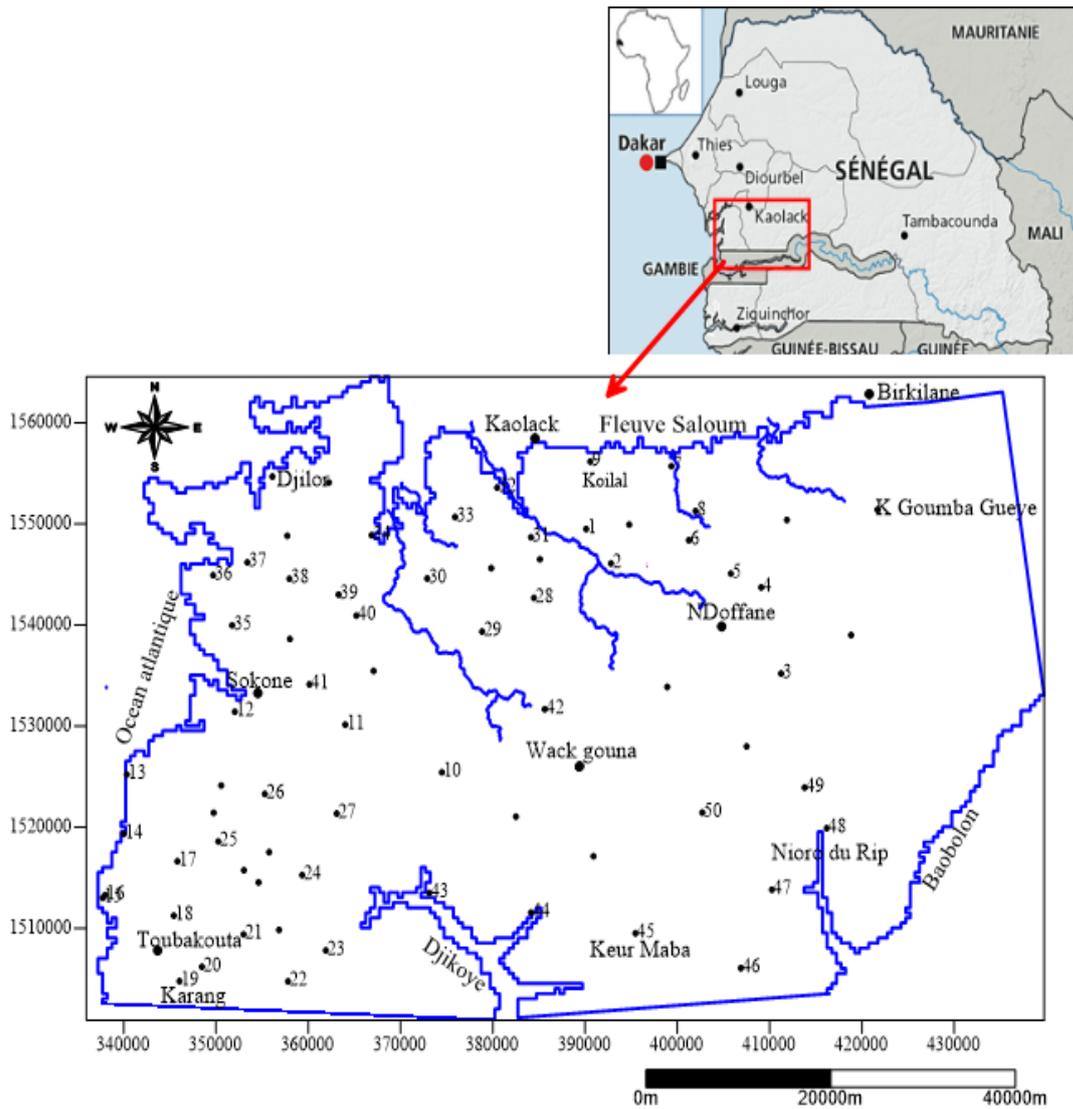


Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude

2-1-2. Présentation géologique

La région du Saloum appartient à la partie méridionale du bassin sédimentaire sénégalo-mauritanien. Le modelé général de la région est un ensemble de vastes plateaux tabulaires pouvant passer de 30 à 40 mètres d'altitude, entaillé par un réseau de larges vallées aux versants peu pentés [5]. Les formations géologiques qui font l'objet de notre étude sont celles du Continental Terminal qui est un dépôt marin détritique ayant été affecté par une altération continentale [6]. Dans la zone d'étude, le Continental Terminal (CT) est essentiellement sablo-argileux (*Figure 2*). Ses variations latérales et verticales de faciès sont fréquentes, passant à des matériaux plus ou moins argileux ou plus ou moins latéritiques [7] à des grès hétérométriques argileux et bariolés, parfois cimentés par de la calcite micritique [6]. En revanche, les grès cuirassés sont constitués d'oxy-hydroxydes de fer, généralement de la goethite, plus rarement de l'hématite qui épigénisent les minéraux argileux [8], essentiellement kaoliniques.

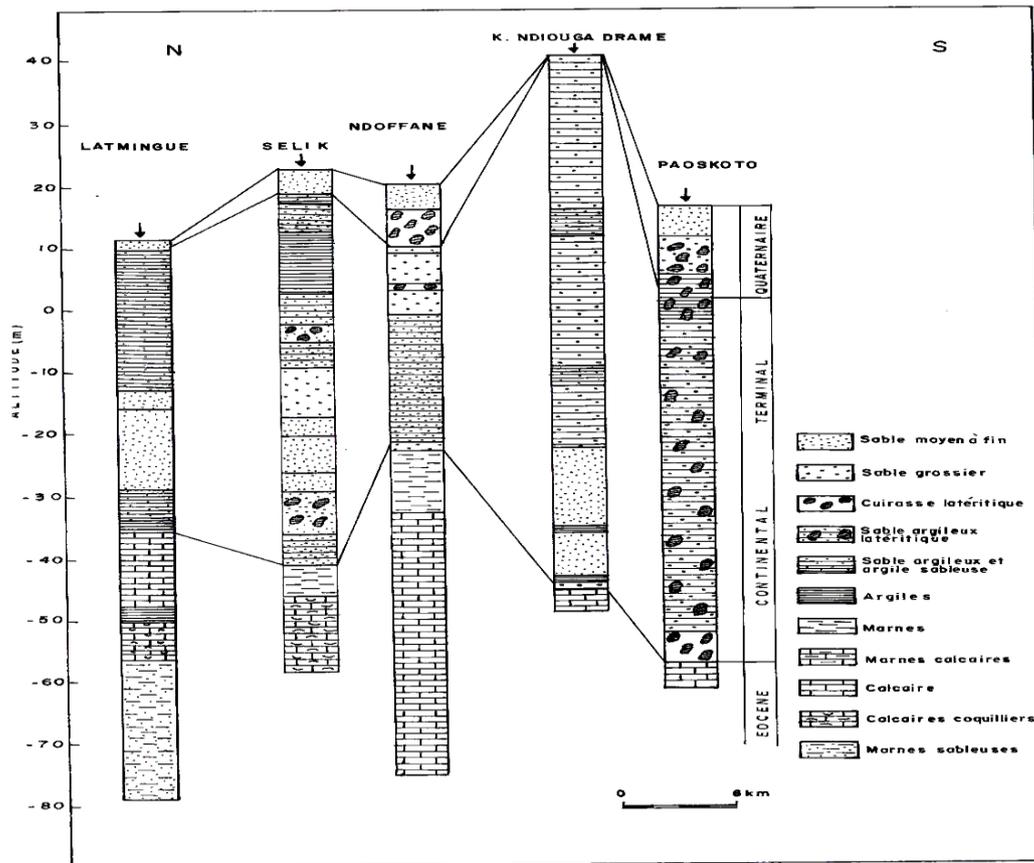


Figure 2 : Logs de forage dans la zone d'étude

L'épaisseur du CT est très variable et les zones de plus forte épaisseur sont associées à d'anciennes vallées incisées dans le substratum marno-calcaire. Le Continental Terminal est surmonté par une formation cuirassée issue d'une altération latéritique en climat chaud et humide localement surmontée des dépôts quaternaires [9].

2-1-3. Présentation hydrogéologique

La nappe contenue dans le CT est principalement alimentée par les eaux de pluie depuis la surface. Son exploitation se fait par des puits de profondeurs variables (5 à 45 m) et par des forages. Les paramètres hydrodynamiques montrent une grande variabilité. Le coefficient de perméabilité (K) varie fortement entre $0,2 \cdot 10^{-4}$ et $3,2 \cdot 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Les plus fortes valeurs de K ($1,2 \cdot 10^{-4}$ et $3,2 \cdot 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) ont été mesurées dans la partie centrale où s'expriment les faciès sableux (sable grossier à moyen) à chenaux gréseux. Les valeurs de transmissivité varient suivant le même ordre de grandeur entre $2,1 \cdot 10^{-4}$ et $6,9 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ avec une moyenne de $1,4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$. Les valeurs de coefficient d'emmagasinement (S) obtenues à partir des pompages d'essai [9] sont peu nombreuses et variables. Ces valeurs sont comprises entre $3,2 \cdot 10^{-4}$ et $4,0 \cdot 10^{-1}$. L'analyse de la carte piézométrique (*Figure 3*) de la nappe montre la présence d'un dôme au Sud-Ouest de la zone. La surface piézométrique présente une morphologie à gradient hydraulique variable avec des valeurs moyennes de 0,1 % au Sud-Ouest ; ce gradient devient très faible vers le creux piézométrique et varie entre 0,03 et 0,06 %. La nappe montre ainsi une variation des conditions hydrodynamiques liée à la diversité de faciès des formations aquifères. Dans le Nord-Est, les modules d'espacement des isopièzes augmentent et deviennent plus importantes dans l'axe de la zone de dépression. Le filet liquide suit une direction nord-sud ce qui laisse supposer une alimentation de la nappe par le fleuve Saloum.

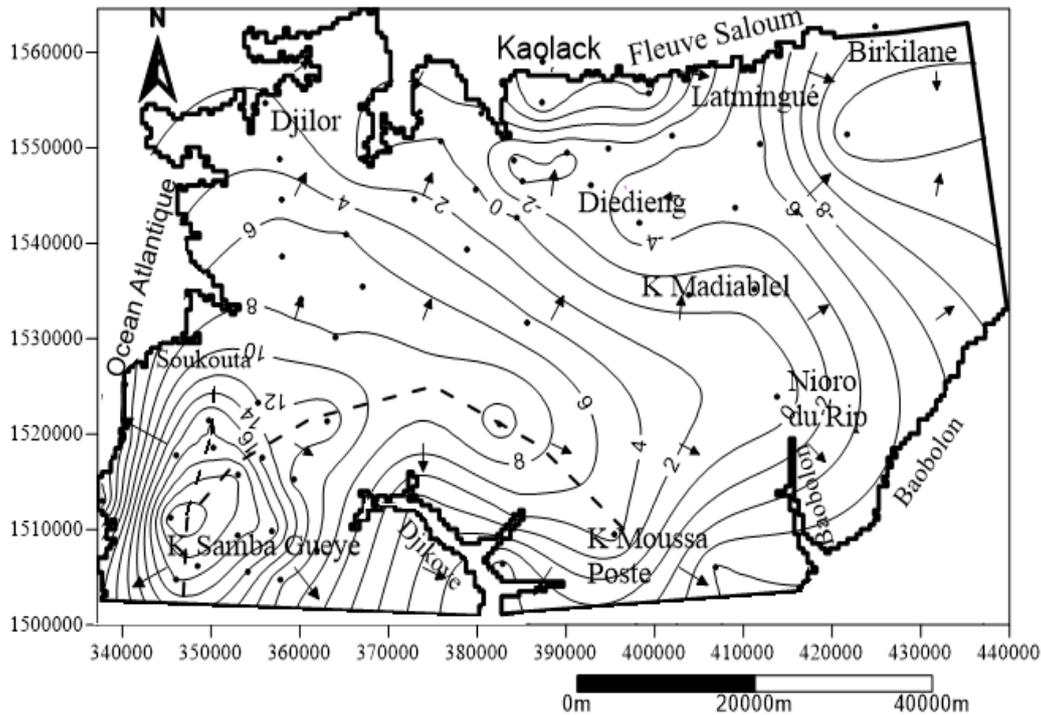


Figure 3 : Carte piézométrique de la nappe en mai 2012

2-2. Échantillonnage et analyses hydrochimiques

La campagne de prélèvements d'échantillons d'eaux destinées à des analyses hydrochimiques a été effectuée sur 65 ouvrages en avril 2015 sur des puits et des forages de la zone d'étude. Le pH, la conductivité, la température et le TDS sont mesurés avec un appareil de terrain WTMulti 350i. Les prélèvements ont été faits à l'aide de flacons en polypropylène (polymère chimiquement inerte) muni d'un double système de fermeture. Les flacons sont rincés deux fois avec l'eau déminéralisée, puis trois fois avec l'eau à échantillonner pour éviter toute pollution. Un premier flacon de 250 mL a été prélevé pour le dosage du système bicarbonaté et l'analyse des autres anions. Un second prélèvement a été fait avec un flacon de 125 mL auquel il a été ajouté 2 mL de HNO_3 ultra-pur afin d'acidifier la solution et empêcher d'éventuelles précipitations avant l'analyse des cations. Du terrain au laboratoire, les prélèvements ont été conservés au frais dans une glacière et à l'abri de la lumière. L'analyse de la composition des eaux a été faite au laboratoire Hydrogéologie, Argile, Sol et Altérations (HydrASA), équipe E₂ de l'Institut de Chimie des Milieux et Matériaux de Poitiers (IC2MP) de l'Université de Poitiers (France). La détermination de la concentration en bicarbonates est effectuée par titration de 100 mL d'échantillon d'eau en agitation continue à l'aide d'une solution d'acide chlorhydrique 10^{-2} N. Le dosage des autres anions majeurs (Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) est fait par chromatographie ionique de type DIONEX ICS1000. Le dosage des cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+) est fait par un spectromètre VARIAN d'absorption atomique en mode flamme. Les échantillons sont filtrés à $0,45 \mu\text{m}$ avant analyse. La fiabilité des dosages est effectuée par l'utilisation de la balance ionique qui permet de vérifier la qualité et la validité des résultats d'analyses chimiques. Seules les analyses ayant une balance ionique inférieure ou égale à 10 % sont retenues [10]. Les résultats des analyses physico-chimiques (**Tableau 1**) ont été traités par des méthodes d'analyse statistique multivariée couplées à la méthode de Stuyfzand. L'approche statistique est basée sur l'utilisation de l'Analyse en Composantes Principales (ACP) et la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) pour étudier les phénomènes liés à l'origine de la minéralisation des eaux, les différentes familles des eaux et identifier les facteurs responsables des regroupements. Les analyses statistiques ont été réalisées sous le logiciel Statistica. La classification de Stuyfzand est utilisée pour une caractérisation des eaux souterraines.

3. Résultats et discussion

3-1. Analyse en composantes principales

Les données traitées par ACP, sont formées de 12 éléments physico-chimiques (variables) mesurés sur 50 échantillons (individus). Le nombre d'axes factoriels à retenir repose sur le critère de [11], pour lequel seuls les axes ayant des valeurs propres supérieures à 1 sont conservés. L'analyse des données montre que le plan factoriel (1 - 2) représente une variance cumulée de près de 65,7 % (**Tableau 2**) avec 49,92 % pour l'axe 1, 15,77 % pour le facteur 2 et le plan (1 - 3) 62,65 % avec 12,74 % pour le facteur 3. L'analyse des variables dans le plan factoriel F_1 - F_2 et le plan F_1 - F_3 est présentée par la **Figure 4**. L'analyse de ces graphes montre que toutes les variables, se groupent sur le pôle positif de l'axe F_1 à l'exception de la température. L'axe F_1 regroupe l'essentiel des éléments (CE, TDS, Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ et Cl^-) responsables de la minéralisation naturelle de l'eau. Le facteur F_1 définit donc un axe de minéralisation globale de l'eau. La corrélation avec l'axe F_1 est plus faible pour les autres anions comme SO_4^{2-} et HCO_3^- et très faible pour NO_3^- , ce qui laisse supposer des origines différentes par rapport aux chlorures. Du point de vue des cations, le potassium montre lui aussi un comportement différent par rapport aux autres cations.

Tableau 1 : Résultats des analyses chimiques des eaux de la nappe du Saloum en avril 2015

N°	Ouvrage Localité	temp. °C	pH	Ca^{2+} mg.L ⁻¹	Mg^{2+} mg.L ⁻¹	Na^+ mg.L ⁻¹	K^+ mg.L ⁻¹	HCO_3^- mg.L ⁻¹	Cl^- mg.L ⁻¹	SO_4^{2-} mg.L ⁻¹	NO_3^- mg.L ⁻¹	TDS mg.L ⁻¹	CE µS.cm ⁻¹
1	Koumbal	28.7	7.5	15.1	3.0	50.9	1.1	30.5	59.6	1.2	45.0	206	413
2	Sikatoroum	29.7	6.9	38.7	6.6	8.5	5.3	146.4	24.6	2.0	0.0	232	365
3	Some	29.5	7.4	24.5	2.1	17.8	4.6	91.5	12.9	3.7	1.3	158	318
4	Touba Darou camp.	30.2	7.3	81.9	2.7	10.7	1.2	274.5	40.5	2.3	0.0	414	589
5	Ndobene	31.1	6.9	6.6	1.3	22.6	0.6	15.3	42.6	0.0	0.0	89	199
6	Daga Youndou	29.7	6.4	18.0	1.6	14.3	0.4	59.0	36.6	0.0	0.0	130	230
7	Latmingué	27.9	7.6	90.3	13.9	60.9	109.8	241.0	280.0	49.5	3.7	849	1530
8	Keur Mamour Lo	27.6	6.2	21.4	0.6	5.6	0.1	22.4	43.9	1.4	1.3	97	309
9	Koïlal	28.7	5.5	69.8	57.4	1150.7	3.1	23.8	1844.9	64.5	25.9	3240	2940
10	Ndrané Scale	31.9	5.4	19.5	0.4	8.1	1.2	61.0	7.2	0.0	0.0	98	75.8
11	Ndrané Ibra	27.9	6.5	4.4	2.6	42.2	1.3	6.1	39.3	0.0	52.0	148	314
12	Diaglé	28.6	6.0	14.6	4.0	81.6	2.5	11.0	138.3	30.5	0.0	283	897
13	Soukouta	27.8	7.5	558.1	217.7	1297.1	28.9	298.9	2926.8	0.0	40.5	5368	9000
14	Néma Ba	29.1	3.6	100.1	24.3	157.3	85.8	1.2	291.1	434.6	0.0	1100	1770
15	Missira 1	26.9	7.1	107.7	12.9	85.0	35.3	103.7	241.5	97.3	11.4	695	1700
16	Missira2	28.0	6.7	4.9	0.5	9.1	0.2	24.4	11.3	1.3	0.0	52	96.3
17	Néma Nding	27.1	4.5	20.3	6.2	58.1	2.6	1.5	110.3	0.0	26.7	226	667
18	Dassilamé Socé	29.2	5.9	2.6	0.2	6.0	0.8	18.3	4.5	0.7	0.0	33	70.9
19	Karang	31.1	7.6	58.8	13.2	88.4	1.3	170.5	118.6	0.0	44.6	495	1040
20	Sirmang	30.0	6.0	0.5	0.0	5.6	0.0	11.0	4.9	0.0	0.0	22	47.3
21	Keur Samba Gueye	29.7	7.2	1.8	0.8	9.4	0.2	12.2	8.7	0.0	1.5	44	163
22	Keur Seyni Guèye	28.9	3.7	22.0	20.2	98.6	2.2	0.9	143.0	0.0	110.9	402	1210
23	Keur Momar Sokhna	29.3	5.7	7.7	0.3	16.6	0.2	11.0	3.7	5.6	35.5	81	156
24	Bambadalo Thiakho	28.5	5.6	0.8	3.4	21.4	2.0	9.1	23.5	0.0	25.7	86	222
25	Keur Lahine Fatim	27.5	5.8	3.6	0.3	30.0	0.3	17.0	16.6	0.3	31.7	100	219
26	Nioro Alassane Tall	27.0	7.9	39.5	6.8	6.8	0.5	143.4	4.2	1.9	0.0	203	438
27	Keur Saloum Diané	27.5	5.2	0.3	0.4	5.6	0.8	6.1	5.4	0.3	0.0	19	47.1
28	Lamaram Badiane	27.5	7.1	66.4	1.9	9.3	7.9	140.3	76.9	2.6	3.4	309	762
29	Ndiagne	26.4	6.9	17.0	3.3	16.9	0.8	68.6	29.6	2.5	0.0	139	259
30	Ndiakhate	32.8	7.8	10.9	0.7	4.9	1.5	36.6	8.5	1.1	0.0	64	145
31	Sama Toucouleur	30.7	7.1	52.4	8.9	23.8	2.2	231.8	53.3	2.4	1.5	376	652
32	Dabane Galadio	28.3	6.5	98.7	37.2	665.8	2.6	27.5	1303.8	142.8	0.0	2278	3570
33	Tiofior	27.5	4.9	18.8	2.1	65.5	2.3	3.7	161.3	2.6	1.8	258	689
34	Bandoulou Touc.	29.3	7.2	235.2	20.5	326.7	7.3	55.4	1107.7	16.3	0.0	1769	3290
35	Tallène	30.1	6.1	11.5	1.2	11.1	0.6	32.0	23.7	1.1	0.0	81	172
36	Lérane Kolli	28.0	6.8	26.5	2.8	14.4	2.7	83.9	40.5	2.4	1.2	174	356
37	Ndiaye Ndiaye Sérère	28.9	5.1	86.3	4.5	45.7	7.2	1.8	288.9	4.2	0.0	439	940
38	Sorom 1	30.0	5.6	11.3	2.9	97.5	2.7	3.7	163.6	4.6	3.5	290	820
39	Thianda Thiamène	29.3	6.1	100.8	5.6	104.0	5.3	43.6	251.2	6.4	40.7	557	1640
40	Keur Mat Thiam	28.6	6.0	2.3	0.1	29.2	0.2	30.9	23.7	0.0	1.1	87	190
41	Passi Diémoul	29.7	7.1	15.7	4.5	35.9	1.3	17.1	47.9	0.0	38.4	161	396
42	Keur Madiabel	29.6	6.5	37.0	3.7	82.5	1.4	65.6	200.7	12.3	0.0	403	850
43	Koular	28.4	6.4	6.5	2.4	16.1	20.5	13.4	61.6	2.4	1.6	125	385
44	Koutango	27.0	6.2	6.6	1.6	4.3	1.5	18.8	8.6	1.2	0.0	43	104
45	Keur Maba Diakhou	31.4	7.4	6.9	1.0	10.9	0.2	24.5	8.1	0.0	10.9	63	111
46	Keur Moussa Poste	32.2	5.9	3.7	1.0	6.4	0.5	18.3	5.8	0.0	0.0	36	69.5
47	Porokhane	31.0	5.5	4.7	1.9	10.1	0.2	10.4	17.4	0.0	1.3	46	131
48	Nioro du Rip	30.6	6.7	14.8	4.2	5.2	0.6	58.0	6.2	22.5	0.0	112	191
49	Paoskoto	32.3	7.8	80.8	2.8	9.9	0.4	222.7	9.1	8.1	0.0	334	398
50	Taïba Niassene	31.0	6.5	16.1	1.1	3.0	0.0	50.3	3.7	1.0	0.0	75	113

Tableau 2 : Valeurs propres et pourcentage de variance exprimée

Axe factoriel	Valeur propre	Pourcentage de variance propre	Valeur propre cumulée	Pourcentage de Variance cumulée
F1	5.99	49.92	5.99	49.92
F2	1.89	15.77	7.88	65.68
F3	1.53	12.74	9.41	78.42

La position des nitrates, des sulfates et des bicarbonates dans le plan (1 x 2) montre (*Figure 4A*) que ces anions ont une origine tout ou partie différente de celle des chlorures, et participent de façon moindre à la minéralisation des eaux. Par ailleurs sur le plan (1 x 3), les nitrates (*Figure 4B*) se discriminent nettement des sulfates et des bicarbonates et indiquent donc une origine anthropique. L'ACP ainsi réalisée montre que la minéralisation globale de l'eau est acquise principalement grâce à un phénomène de dissolution de la roche.

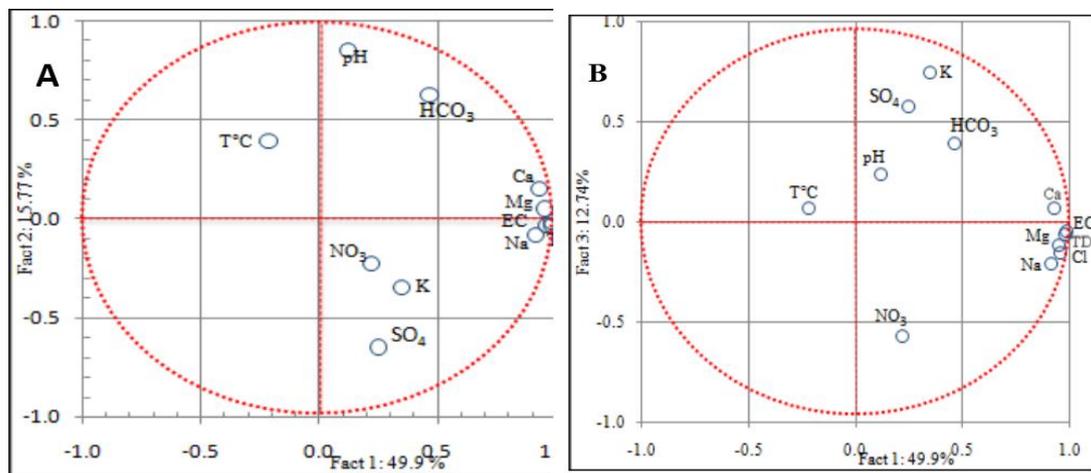


Figure 4 : Analyse des variables dans le plan factoriel F₁-F₂ (A) et F₁-F₂ (B)

3-2. Analyse en classification hiérarchique ascendante (CHA)

L'analyse hiérarchique ascendante est une technique de classification hiérarchique des données qui est largement appliquée en Sciences de la Terre [12], et fréquemment utilisée pour la classification des données hydrogéochimiques [12 - 17]. Cette méthode 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 [18]. Le dendrogramme issu de la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) des points d'eau se basant sur 11 paramètres physicochimiques (*Figure 5*) a permis de mettre en évidence trois grands groupes (ou Clusters) à l'intérieur desquelles des sous-groupes (Sous-Cluster SCI) peuvent être distingués. Pour chaque famille ainsi obtenue, les valeurs moyennes des différents paramètres (*Tableau 3*) permettent d'appréhender leurs différences hydrogéochimiques.

- *Le groupe 1* comprend les puits 13, 34, 32, 9 et concerne 8 % des échantillons d'eau. Il représente un type d'eau très minéralisé qui est fortement influencé par l'intrusion d'eaux marines et / ou saumâtres. Ces ouvrages sont localisés vers la mer (13) et dans les environs immédiats du fleuve Saloum (34, 32, 9). La conductivité électrique oscille entre 2940 et 9000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ avec une moyenne de

4700 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Na^+ est le cation dominant tandis que Cl^- l'anion dominant (**Figure 6**) d'où la présence d'un faciès chloruré sodique (Na-Cl) avec une concentration moyenne de chlorure de 1795 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ et de sodium de plus de 800 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$;

- **Le groupe 2** est formé de deux sous-groupes (SCI 2-1 et SCI 2-2). L'anion dominant de ce groupe est le chlorure. Le sous-groupe SCI 2-1 contient 8 % des échantillons et est représenté par les ouvrages 14, 39, 35 et 7 qui sont sous l'influence de l'Océan (14, 35) et du fleuve Saloum (39,7) mais moins accentué que le groupe 1. La conductivité moyenne pour ce sous-groupe est de 1660 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ce qui fait que cette famille est caractérisée par une eau très minéralisée. Tout comme pour le cluster 1, l'anion dominant des eaux de ce sous-groupe est Cl^- tandis que Na^+ est le cation dominant. Mais il faut noter que les teneurs de Ca^{2+} et de HCO_3^- sont importantes et sont proches de celles de Na^+ .

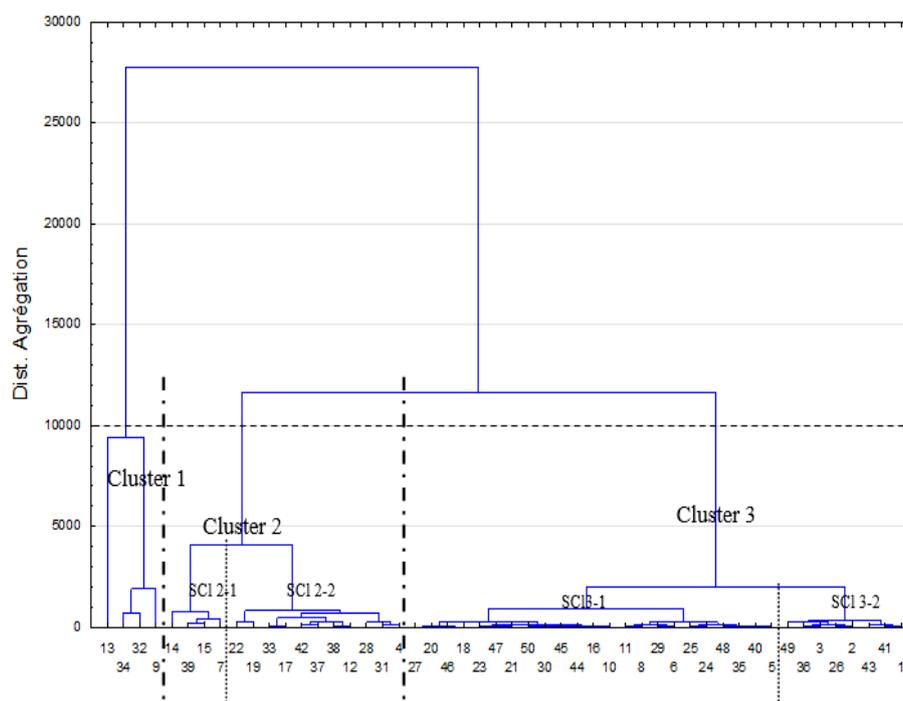


Figure 5 : Dendrogramme de la classification des eaux souterraines de la zone

Tableau 3 : Valeurs moyennes des paramètres hydrochimiques des trois groupes d'eaux

Faciès		t	CE	pH	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	Cl^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}	TDS		
Cluster	Sous-Cluster	Code	Nb	$^{\circ}\text{C}$	$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$								
C1	aucun	C1-1	4	28.5	4700.0	6.68	860.1	240.4	83.2	10.5	1795.8	101.4	55.9	3163.8
C2	SCI2-1	SC12-1	4	28.3	1660.0	6.10	101.8	99.7	14.2	59.0	266.0	97.4	146.9	800.3
	SCI2-2	SC12-2	11	29.1	828.7	5.94	60.1	42.7	6.4	3.0	135.9	82.3	5.6	354.0
C3	SCB-1	SC13-1	23	29.5	158.0	6.28	13.0	8.1	1.2	0.6	16.7	27.0	1.7	75.9
	SCB-2	SC13-2	8	29.2	383.6	7.22	20.1	30.9	3.9	4.5	32.6	93.6	2.7	199.1

Nb : nombre d'échantillons

Les teneurs de sulfates varient peu autour de leur valeur moyenne, soit 147 mg.L⁻¹. De ce fait, le principal faciès hydrochimique de ce groupe 2, défini par l'association Na-Ca-Cl-SO₄, est caractéristique d'un mélange d'eaux de différentes origines. Dans ce groupe, les fortes teneurs en Ca²⁺ pourraient résulter du contact de l'eau de mer avec l'eau douce de la nappe en terrains argileux et d'un échange entre Ca²⁺ adsorbé et le Na⁺ en solution. Le sous-groupe SC12-2 correspond aux ouvrages 4, 12, 17, 19, 22, 28, 31, 33, 37, 38, 42 et concerne 22 % des échantillons d'eau. Les eaux de ce sous-groupe sont moins minéralisées que les eaux du sous-groupe précédent. La CE varie de 589 à 1210 μS.cm⁻¹ avec une moyenne de 829 μS.cm⁻¹. Les deux sous-groupes SC12-1 et SC12-2 sont semblables du point de vue cationique, avec une domination de Na⁺ et Ca²⁺, mais différent quant à l'association des anions, avec des teneurs beaucoup plus élevées en HCO₃⁻ dans le SC12-2. D'autre part, le sous-groupe SC12-1 est marqué par la prédominance des sulfates sur les bicarbonates. Le sous-groupe SC12-2 définit donc le faciès Na-Ca-Cl-HCO₃ qui semble être en phase avec le résultat d'interactions eau-roche se produisant en zone d'eau diluée.

- *Le groupe 3* comprend l'ensemble des autres ouvrages et représente 62 % des échantillons d'eau. Ce faciès correspond à des eaux relativement douces pour lesquelles la conductivité électrique est comprise entre 47 et 438 μS.cm⁻¹. Ces ouvrages sont rencontrés pour l'essentiel dans la zone de recharge au sud-ouest, dans le centre de la zone d'étude et au sud-est. L'anion dominant y est le bicarbonate (*Figure 6*). Ce groupe se divise en deux sous-groupes (SC13-1 et SC13-2) dont la distinction repose sur leurs teneurs en Ca²⁺ respectives (*Figure 6*). Le sous-groupe SC13-2 est le plus calcique et définit le faciès Ca-HCO₃ que l'on rencontre dans 8 ouvrages (1, 2, 3, 26, 36, 41, 43, 49) soit 16 % des échantillons. Dans cette zone la présence du substratum calcaire peut être à l'origine de ce faciès avec le phénomène de dissolution. Le sous-groupe SC13-1 se caractérise par des conductivités plus faibles (158 μS.cm⁻¹ en moyenne) et une prédominance du cation Na⁺ (même si Ca²⁺ est en teneur significative). Il a été détecté dans 23 ouvrages soit 46 % des échantillons. Ce faciès est de type Na-Ca-HCO₃. Ce type d'eau émane de processus d'échange de base où l'argile libère le sodium dans l'eau et capte le Ca²⁺ de l'eau d'où sa diminution.

La méthode de HCA 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 et 3 qui représentent 92% des échantillons d'eau. Cette classification montre aussi que les eaux présentent une très grande hétérogénéité de faciès chimiques.

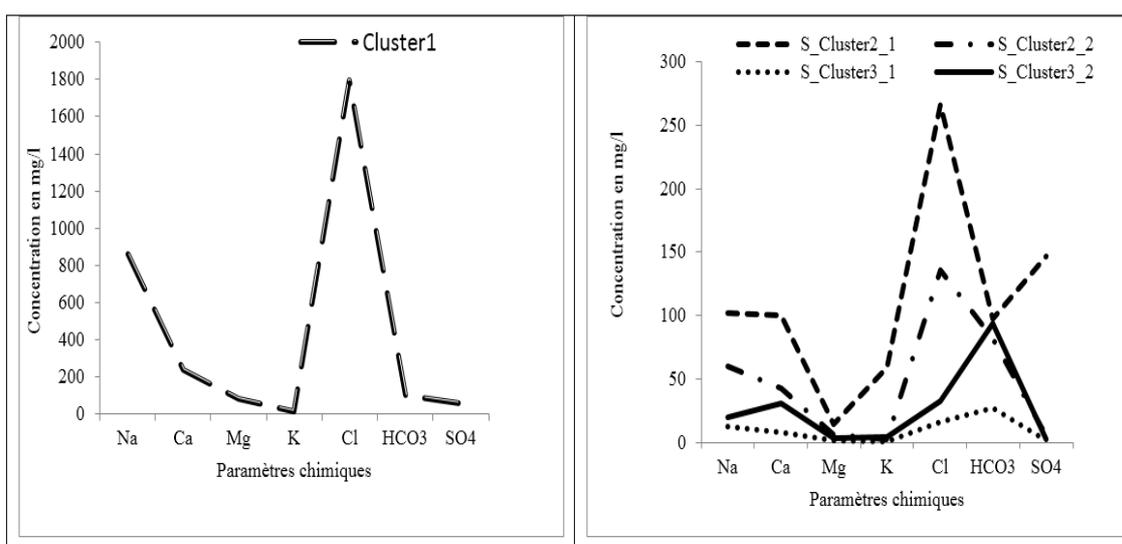


Figure 6 : Évolution des concentrations des ions majeurs au niveau des différents Clusters

3-3. Identification de la salinisation selon le type d'eau par la méthode de Stuyfzand

Cette classification hydrochimique a été appliquée à l'étude des eaux souterraines en zones côtières [19 - 24]. Cette méthode est adaptée à l'étude du phénomène de salinisation ou du processus inverse, l'adoucissement. Son avantage réside à sa capacité à reconnaître le type d'échange de cations qui s'est produit dans l'eau ; s'il y en a [20]. Cette classification est basée sur quatre niveaux de subdivision d'eau donnant un type d'eau. Chaque type d'eau est représenté par un code englobant plusieurs renseignements sous forme de symboles [25] :

- le premier niveau ou type principal est représenté par la concentration (mg.L^{-1}) en ion chlorure (**Tableau 4**);
- le second niveau ou type indique l'alcalinité qui peut être remplacée par le titre hydrotimétrique (TH) ou la dureté totale (**Tableau 5**) représentant la somme de la dureté calcique et celle magnésienne (**Équation 1**).

$$TH (\text{meq / l}) = ([\text{Ca}^{+2}] + [\text{Mg}^{+2}]) \times 5 \quad (1)$$

- le troisième niveau donne le sous-type d'eau qui est déterminé par la distribution relative des cations et des anions en se basant sur des diagrammes triangulaires ;
- le quatrième niveau représente la classe dont la détermination repose sur la sommation de Na^+ , K^+ et Mg^{2+} . Il donne une indication sur le type d'échange de cation existant (**Tableau 6**). La somme de (Na^+ , K^+ et Mg^{2+}), mesurée en meq.L^{-1} , est corrigée par rapport à la contribution d'eau de mer comme le montre **l'Équation 2**:

$$(\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Mg}^{2+})_{\text{corrigé}} = (\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Mg}^{2+})_{\text{mesuré}} - 1.0716 \times \text{Cl} \quad (2)$$

Tableau 4 : Types principaux d'eau selon la concentration en chlorure

Type principal	[Cl-]	
Qualification	Code	mg.L^{-1}
Eau douce (fresh)	F	< 150
Eau douce-saumâtre (fresh-brackish)	Fb ou f	150-300
Eau saumâtre (brackish)	B	300-1000
Eau saumâtre-salée (brackish-saline)	Bs	1000-10000
Eau salée (saline)	S	10000-20000
Eau hypersalée (hyperhaline)	H	> 20000

Tableau 5 : Code et type d'eau selon la dureté totale (TH)

Type			TH
N°	Nom	Code	meq.L^{-1}
-1	Eau très douce	*	< 5
0	Eau douce	0	5 à 10
1	Eau dure	1	10 à 20
2	Eau assez dure	2	20 à 40
3	Eau très dure	3	40 à 80
4	Eau extrêmement dure	4	80 à 160
5	Eau extrêmement dure	5	160 à 320
6	Eau extrêmement dure	6	320 à 640
7	Eau extrêmement dure	7	640 à 1280
8	Eau extrêmement dure	8	1280 à 2560
9	Eau extrêmement dure	9	> 2560

Tableau 6 : Détermination du code d'échange des cations

Signification	Code	Conditions de correction de $(Na^+ + K^+ + Mg^{2+})$
$(Na^+ + K^+ + Mg^{2+})$ en déficit ⁽¹⁾	-	$< -\sqrt{\frac{1}{2} CI}$ et $< 1.5 (\sum K - \sum A)$
$(Na^+ + K^+ + Mg^{2+})$ en équilibre ⁽²⁾	0	$\geq -\sqrt{\frac{1}{2} CI}$ et $\leq \sqrt{\frac{1}{2} CI}$
$(Na^+ + K^+ + Mg^{2+})$ en surplus ⁽³⁾	+	$> +\sqrt{\frac{1}{2} CI}$ et $> 1.5 (\sum K - \sum A)$

(1) Intrusion d'eau salée ; (2) état d'équilibre ; (3) adoucissement ; $\sum K$ = somme des cations ; $\sum A$ = somme des anions .

L'analyse de l'évolution spatiale des types d'eaux souterraines (**Figure 7**) issue de l'exploitation des données chimiques par la méthode de Stuyfzand révèle l'existence de trois types d'eau. L'eau souterraine est douce à saumâtre (Fb) pour 16 % des échantillons, saumâtre-salée (Bs) pour 8 % et douce (F) pour 76 %. Si nous faisons référence au niveau 4 de Stuyfzand, 24 % des échantillons présente un indice «-» donc une salinisation des eaux de la nappe. Le regroupement détecté par la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) est confirmé par la classification de Stuyfzand.

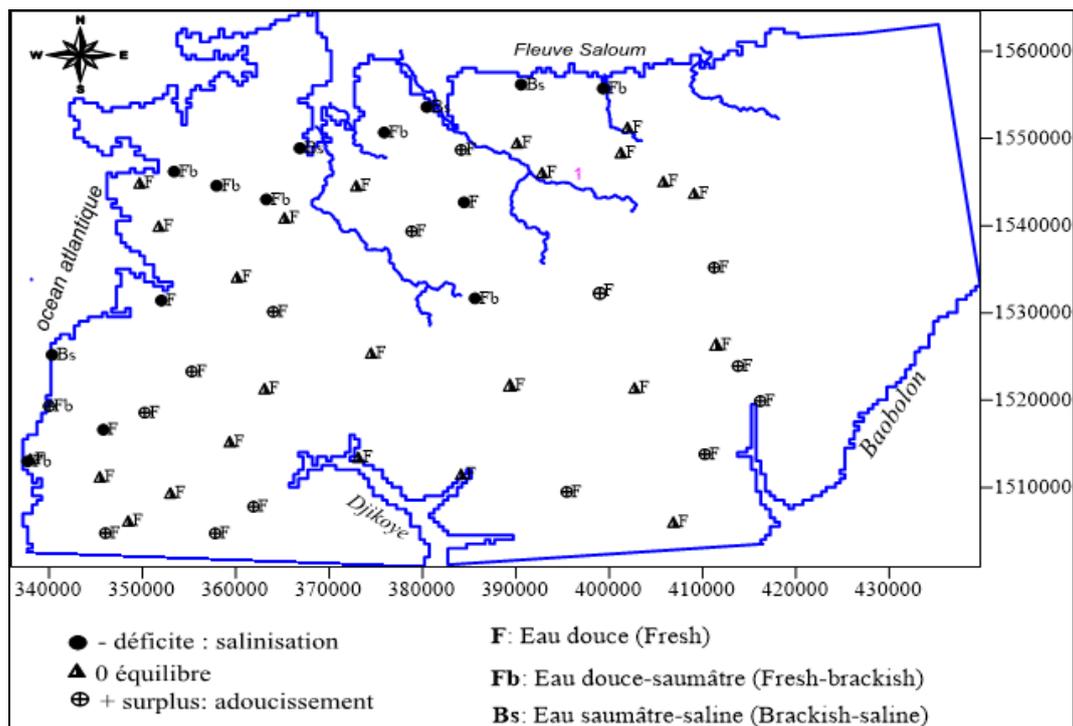


Figure 7 : Répartition spatiale des types d'eau suivant la classification de Stuyfzand

Le type Bs est rencontré dans les ouvrages 9, 13, 32, 34 et correspond au groupe 1 de la CHA. Ces eaux sont saumâtres à salées extrêmement dures avec un faciès chloruré sodique et un indice « + » qui montre la présence de l'échange cationique. Le type Fb (groupe 2 de la CHA) est rencontré dans les ouvrages aux abords de l'océan 15, 14, 37, 38, 39 et vers le fleuve Saloum 7, 33. Un seul ouvrage (42) ayant ce type d'eau est rencontré à l'intérieur des terres. Ce sont des eaux douces à saumâtres modérément dures à dures sauf pour

deux ouvrages (38 et 33) où les eaux ont un indice 0 (**Tableau 6**). Le type F est le type le plus fréquemment rencontré sur l'ensemble des ouvrages. Le phénomène d'adoucissement se produit de manière diffuse sur la zone d'étude. Ces eaux sont douces à modérément dure avec des faciès variables. Les ouvrages affichent un équilibre (0) ou des bilans positifs. Les ouvrages présentant un bilan positif sont localisés dans la partie Sud-Ouest de la zone d'étude, près de la côte atlantique, témoignant un début de salinisation des eaux de la nappe. Les processus de salinisation qui sont à l'origine de ces types d'eau sont les mêmes que ceux définis précédemment à savoir le processus d'échange cationique, une intrusion saline dans les eaux douces de la nappe, un début de salinisation au niveau de certains coins de l'aquifère douce où le sodium, potassium et magnésium sont adsorbés en échange avec le calcium libéré [26].

4. Conclusion

Les résultats obtenus par l'ACP montrent que les variables qui contrôlent la salinisation des eaux sont le Na^+ , le Cl^- , le Ca^{2+} , le Mg^{2+} et le K^+ . Les résultats de l'ACH et de la classification de Stuyfzand ont montré l'existence de trois groupes d'eau avec la prédominance de deux types de faciès chloruré sodique et bicarbonaté calcique. 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 et à l'intrusion des eaux salées. La répartition spatiale de la salinité indique que dans l'ensemble les eaux de la région sont douces avec une dureté faible. Les zones les plus minéralisées sont du côté de la mer et du fleuve Saloum. Cette salinité est surtout contrôlée par les ions chlorures et sodium d'où la présence d'eau douce à saumâtre et saumâtre-salée dans ces environs. Ce phénomène de salinisation se manifeste de manière différente d'un point à l'autre. Cette détérioration de la qualité de l'eau doit nous amener à réfléchir sur la mise en place d'un modèle d'intrusion des eaux salées pour une meilleure gestion de la qualité de l'eau dans cet aquifère.

Références

- [1] - United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). *Groundwater Resources of the World and Their Use*, UNESCO, Paris, France, (2004)
- [2] - S. NDOYE, Comportement hydrodynamique et hydrochimique de la nappe côtière du Continental Terminal du Saloum. Thèse 3eme cycle Univ. Cheikh Anta Diop de Dakar, (2003) 152 p.
- [3] - S. FAYE, 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. Thèse Doctorat d'Etat es Sciences. Université Ch A. Diop Dakar/ Sénégal, (2005)
- [4] - A. MARJOUA, P. OLIVE, C. JUSSERAND, Apports des outils chimiques et isotopiques à l'identification des origines de la salinisation des eaux : Cas de la nappe de La Chaouia côtière (Maroc). *Revue des sciences de l'eau*, Vol. 10, N° 4 (1997) 489 - 505
- [5] - P. PEREZ, Genèse du ruissellement sur les sols cultivés du Sud Saloum du diagnostic à l'aménagement de parcelle Thèse es Sciences en agronomie Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier, (1994) 250 p.
- [6] - J. R. LAPPARTIENT, Le Continental Terminal et le Pléistocène ancien du bassin sénégal-mauritanien. Stratigraphie, Sédimentologie, diagenèse, altération, reconstitution des paléorivages au travers des cuirasses. Thèse sciences, Marseille, (1985) 272 p.
- [7] - Y. NOËL, Etude hydrogéologique du Continental Terminal de Sine Gambie première phase et rapport de synthèse, BRGM DKR 75 DK 05, (1975) 30 p.

- [8] - R. FLICOTEAUX, J. R. LAPPARTIENT, Le passage de l'Eocène Inférieur à l'Eocène moyen sur la bordure orientale du dôme de Ndiass (Sénégal occidental). *Travx. Labo. Sc. Terre, Fac. Sci. Marseille Sr-Jérôme. Série A*, N°8 (1972) 28 p.
- [9] - C. DILUCA, Etude hydrogéologique du Continental Terminal entre le Sine et la Gambie, deuxième phase et rapport de synthèse, BRGM DKR 76 DK, (1976) 33 p.
- [10] - C. W. FETTER, *Applied Hydrogeology*. Prentice Hall Inc., New Jersey (USA), (1994) 691 p.
- [11] - H. F. KAISER, The Varimax criterion for analytical rotation in factor analysis. *Psychometrika*, 23b (1958) 187 - 200
- [12] - 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 (2008) 294 - 313
- [13] - 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 (1995) 39 - 47 p.
- [14] - 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 (2002) 455 - 474
- [15] - F. H. AMMARA, N. CHKIR, K. ZOUARI, B. HAMELIN, P. DESCHAMPS, A. AIGOUN, Hydro-geochemical processes in the complex Terminal aquifer of southern Tunisia : An integrated investigation based on geochemical and multivariate statistical methods. *Journal of African Earth Sciences*, 100 (2014) 81 - 95
- [16] - L. BELKHIRI, A. BOUDOUKHA, L. MOUNI, T. BAOUZ, Application of multivariate statistical methods and inverse geochemical modeling for characterization of groundwater - A case study : Ain Azel plain (Algeria), *Geoderma*, 159 (2010) 390 - 398
- [17] - S. M. YIDANA, Groundwater classification using multivariate statistical methods : Southern Ghana. *Journal of African Earth Sciences*, 57 (2010) 455 - 469
- [18] - M. TEMPL, P. FILZMOSE, C REIMANN, Cluster analysis applied to regional geochemical data : Problems and possibilities. *Applied Geochemistry*, 23 (2008) 2198 - 2213
- [19] - P. J. STUYFZAND, A new hydrochemical classification of water types : principles and application to the coastal dunes aquifer system of the Netherlands. *Proc. 9th Salt Water intrusion meeting, Delft 12-16 may, delft Univ. Techn.*, (1986) 641 - 655
- [20] - P. J. STUYFZAND, A new hydrochemical classification of water types. *Regional Characterization of water quality proceeding of the Baltimore Symposium IAHS Publ*, N° 182 (1989)
- [21] - S. JEMAI, Evolution de l'état de la nappe de Korba : Etude hydrogéochimique et modélisation numérique, mémoire de fin d'étude du cycle de spécialisation de l'INAT, (1998) 180 p.
- [22] - B. F. JONES, A. VENGOSH, E. ROSENTHAL, Y. YECHIELI, Geochemical investigations, in : J. Bear et al (eds.), *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers*, Kluwer Academic Publisher, (1999) 51 - 71
- [23] - A. EL ACHHEB, Contribution à l'étude de la minéralisation et identification des sources de contamination des eaux souterraines. Application au système aquifère du bassin Sahel Doukkala (Maroc). Thèse. Univ. Chouaib Doukkali. El Jadida, (2002) 206 p.
- [24] - M. BOUGHRIBA, M. ABDERRAHMANE, Z. YASSINE, O. ABDELILLAH, Extension spatiale de la salinisation des ressources en eau et modèle conceptuel des sources salées dans la plaine des Triffa (Maroc nord-oriental). *Géoscience*, Vol. 338, Issue 11, (2006) 768 - 774
- [25] - Z. OULAAROSS, Etude climatologique, hydrogéologique et géophysique du Sahel côtier des Doukkala (Maroc). Apport de l'analyse statistique et de l'inversion des données géoélectriques à l'étude du biseau salé de la lagune de Sidi Moussa. *Thèse es Sciences*. Université Bordeaux1, (2009) 279 p.
- [26] - P. PULIDO-LEBOEUF, Seawater intrusion and associated processes in a small coastal complex aquifer (Castell de Ferro, Spain). *Appl. Geochem.*, 19 (2004) 1517 - 1527