

## Variation spatiale et temporelle de la salinité des eaux souterraines dans la région nord et ouest de l'aquifère Sine-Gambie (Sénégal)

### [ Spatial and Temporal Variation of groundwater Salinity in the Northern and Western Region in the Sine-Gambie aquifer (Senegal) ]

*Seyni NDOYE<sup>1</sup>, Moumtaz RAZACK<sup>2</sup>, and Cheikh Bécaye GAYE<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Université Cheikh Anta Diop, Ecole Supérieure Polytechnique, Département de Génie Civil, BP 5085 Dakar Fann, Sénégal

<sup>2</sup>Université de Poitiers, Département d'hydrogéologie, UMR 7285, 5 Rue Albert Turpain, B8 TSA 51106, 86073 Poitiers Cedex 9, France

<sup>3</sup>Université Cheikh Anta Diop, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Géologie, BP 5005 Dakar Fann, Sénégal

---

Copyright © 2018 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:** This study intends to see the temporal and spatial evolution of groundwater salinization at the northern and western zone of the CT aquifer in the Sine-Gambie region (Senegal). To do this, a hydrochemical study was conducted in 2015 and compared with previous studies (2000 and 2012). This study is essentially based on the two parameters, electrical conductivity and chloride content. The results obtained show that the evolution of salinity observed in these areas is explained by a contamination of the groundwater by the waters from the Saloum River and the sea. The comparison of groundwater electrical conductivity maps showed a salinity increase between 2000 and 2015; with a salinization phenomenon which increases toward inland in phase with chloride levels that doubled in some wells. The study also shows that several calcium bicarbonate facies have evolved to calcium chloride facies, and calcium chloride facies to chloride sodium facies.

**KEYWORDS:** Evolution, conductivity, chloride, aquifer, Saloum, Salinization.

**RESUME:** Cette étude se propose de voir l'évolution temporelle et spatiale de la salinisation des eaux souterraines au niveau de la zone bordière nord et ouest de la nappe du CT de la région Sine-Gambie (Sénégal). Pour ce faire, une étude hydrochimique a été réalisée en 2015 et comparée avec des études précédentes (2000 et 2012). Cette étude repose pour l'essentiel sur les deux paramètres que sont la conductivité électrique et la teneur en chlorure. Les résultats obtenus montrent que l'évolution de la salinité observée au niveau de ces zones est expliquée par une contamination de la nappe par les eaux du fleuve Saloum et de la mer. La comparaison des cartes de conductivités électriques de l'eau souterraine a montré une augmentation de la salinité entre 2000 et 2015 avec un phénomène de salinisation qui s'accroît vers l'intérieur des terres en phase avec des teneurs en chlorure qui ont doublé dans certains puits. L'étude montre également que plusieurs faciès bicarbonatés calciques ont évolué vers des faciès chlorurés calciques et des faciès chlorurés calciques vers des faciès chlorurés sodiques.

**MOTS-CLEFS:** Evolution, conductivité, chlorure, aquifère, Saloum, Salinisation.

## 1 INTRODUCTION

Pour les pays côtiers comme le Sénégal, plus de 60 % de la population de même que 80 % de l'activité industrielle et une part très importante de l'activité économique sont présentes dans les zones côtières [1]. Ainsi sur les 700 Km de littoral du

pays, les ressources en eau, soumises à une répartition spatiale et saisonnière très déséquilibrées, représentent un enjeu capital. Cette ressource qui était jadis de bonne qualité, se trouve actuellement menacée par diverses sources de contamination ponctuelles et diffuses en région côtière.

Dans la zone du Saloum, région Centre Ouest du Sénégal, les besoins en eau sont assurés essentiellement par l'exploitation d'une nappe souterraine, associée aux formations sablo argileuses du Continental Terminal [2], [3], [4], [5]. Cette zone estuarienne et deltaïque est caractérisée par les remontées d'eau marine dans les systèmes fluviaux qui peuvent atteindre des dizaines de kilomètres à l'intérieur des terres [1]. Dans le système du Saloum où la nappe libre est en contact aussi bien avec l'océan et les eaux hyper salées du fleuve Saloum [6], ces phénomènes sont particulièrement prépondérants d'où sa grande vulnérabilité. Une salinisation partielle ou totale d'un milieu poreux conduit à une pollution de l'eau douce et qu'il serait généralement difficile de faire disparaître [7], [8]. Et, à l'échelle de plusieurs décennies, des travaux et études d'impact ont montré qu'une telle situation devient quasiment irréversible [9].

Il serait judicieux de connaître et d'assurer une surveillance de la qualité de cette ressource. Cette étude a pour but donc d'évaluer la variation spatio-temporelle de la qualité physico-chimique des eaux de la nappe du Saloum sur les zones bordières au nord avec le fleuve Saloum hypersalé et à l'ouest avec la présence de l'océan afin de mieux apprécier la pollution saline dans ces secteurs. Cette étude s'est basée sur différentes méthodes hydrochimiques et des techniques de cartographie.

## **2 DESCRIPTION DU SECTEUR D'ETUDE**

### **2.1 CONTEXTE GEOGRAPHIQUE ET CLIMATIQUE**

La zone d'étude, représentée par la région comprise entre le fleuve Saloum et la Gambie, est située au centre Ouest du Sénégal entre 13°35 à 14°10 de latitude Nord et 15°40 à 16°30 de longitude Ouest. Elle est composée de communes appartenant à la région de Fatick et de Kaolack, et s'étend sur une superficie de 5000 Km<sup>2</sup> environ (figure 1).

Le climat est de type soudano-sahélien, avec une pluviométrie interannuelle allant de 600 à 800mm. Elle est caractérisée par deux saisons, une pluvieuse de 3 à 4 mois et l'autre sèche d'environ 7 à 9 mois de novembre à juin. La température moyenne mensuelle mesurée à la station de Kaolack au cours de la période 1950-2016 varie de 25,6 °C en janvier à 30,9 °C au mois de mai. L'humidité relative (Hr) tourne au tour d'une moyenne de 56% pour la période de 1981 à 2016 et peut atteindre une valeur maximale de 96 %. Le couvert végétal est caractérisé par une savane arborée avec prédominance des épineux accompagnés d'espèces ligneuses, sous ligneuses et d'un tapis herbacé.

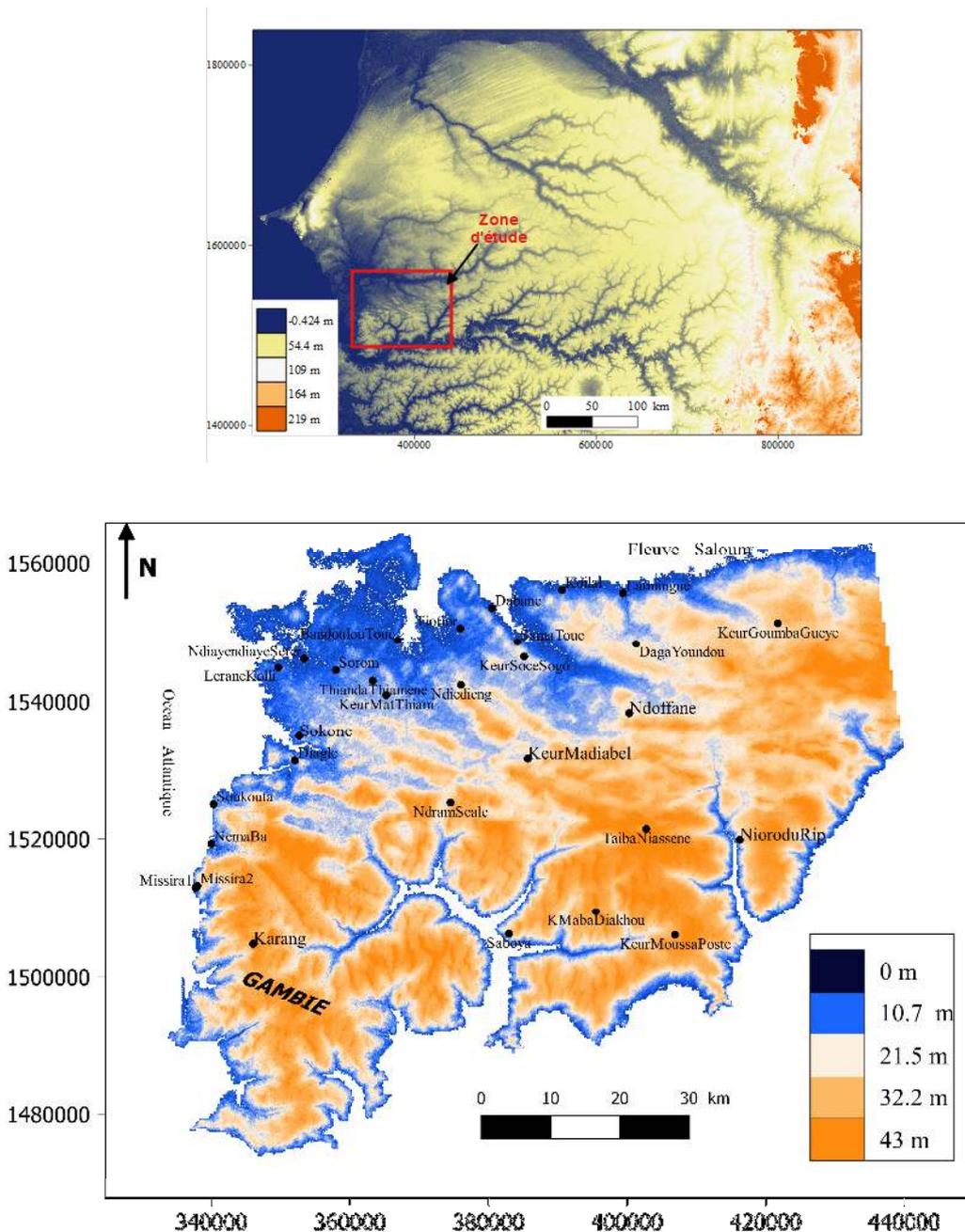


Fig. 1. Localisation de la zone d'étude

## 2.2 CADRE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

La géologie de la zone d'étude s'identifie à celle du bassin sédimentaire sénégalo-mauritanien représenté par des formations d'âge mésozoïque. La formation géologique qui nous intéresse dans cette étude au niveau de la région du Saloum est celle du Continental Terminal (CT) caractérisée par une succession de sables, de sables argileux et d'argiles. Le CT est caractérisé par des variations latérales et verticales de faciès, passant à des matériaux plus ou moins argileux ou plus ou moins latéritiques [2] à des grès hétérométriques, argileux et bariolés, parfois cimentés par de la calcite micritique [10]. Dans les grès cuirassés, le ciment est constitué d'oxy-hydroxydes de fer, généralement de la goéthite, plus rarement de l'hématite qui épigénise les minéraux argileux [11], [12] essentiellement kaolinique. Le CT, dans cette zone, est un dépôt marin détritique qui a été affecté par une altération continentale [10].

Du point de vue hydrogéologique, sur ce bassin, sont dénombrés deux principaux aquifères ; l'aquifère salée du Maastrichtien et celui du CT. Ce dernier contient la nappe la plus importante. Dans cette nappe, l'eau s'y trouve à des profondeurs croissantes de l'Ouest vers l'Est. L'épaisseur varie d'une dizaine de mètres sur sa limite Nord à 80 m au droit

d'anciennes vallées creusées dans le substratum. Cette puissance est souvent importante pouvant atteindre 130 m comme à Keur Madiabel (figure 2) [13]. Cet aquifère est principalement alimenté 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.

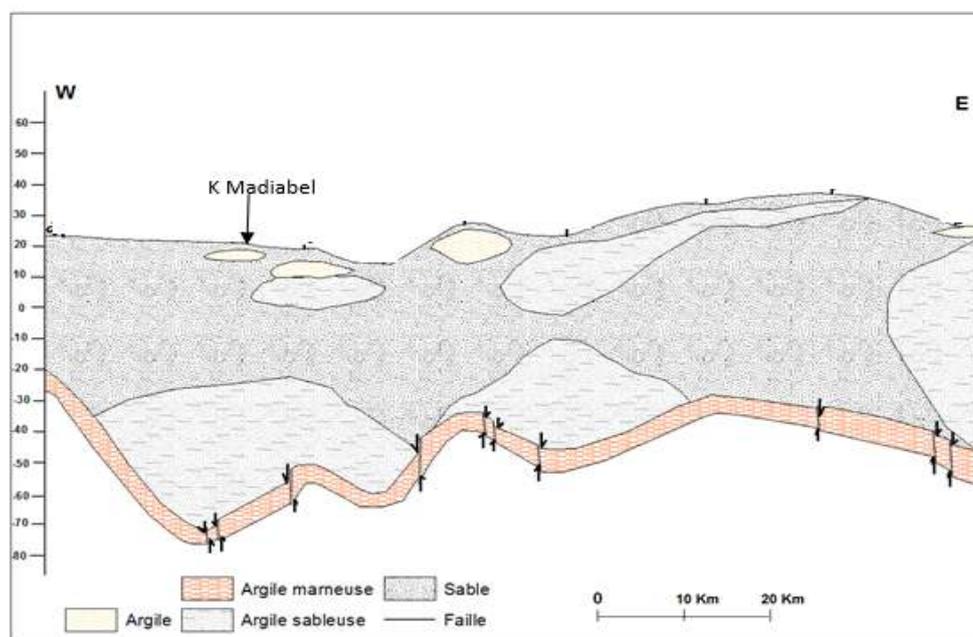


Fig. 2. Coupe géologique de la zone d'Ouest vers l'Est passant par K. Madiabel [13].

### 3 MATERIELS ET METHODES

Cinquante échantillons d'eau ont été prélevés au niveau de la zone d'étude dont vingt échantillons dans des ouvrages rencontrés dans des localités se trouvant dans les environs du Fleuve Saloum et du littoral en avril 2015. L'ensemble des prélèvements a fait l'objet d'analyses physico-chimiques. Les paramètres chimiques et physiques tels que température, pH, conductivité électrique, alcalinité ont été mesurés sur le terrain au moment du prélèvement. Les analyses chimiques ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ ) ont été effectuées au laboratoire Hydrogéologie, Argile, Sol et Altérations (HydrASA), équipe E<sub>2</sub> de l'Institut de Chimie des Milieux et Matériaux de Poitiers (IC<sub>2</sub>MP) de l'Université de Poitiers (France). Le dosage de ces anions est fait par chromatographie ionique de type DIONEX ICS1000 et celui des cations par un spectromètre VARIAN d'absorption atomique en mode flamme.

Les résultats des analyses physico-chimiques (tableau 1) sur les eaux souterraines ont fait l'objet d'une étude comparative avec des données existantes sur ces mêmes ouvrages en avril 2000 [14], [4] et mai 2012 [15]. Le traitement des données a nécessité l'utilisation de logiciels tels que Diagramme, Surfer, Grass GIS, QGIS pour la cartographie et l'analyse de l'évolution de la salinité.

### 4 RESULTATS ET DISCUSSIONS

L'étude de la variation spatio-temporelle de la salinité est faite avec l'utilisation des ions majeurs tels que  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  et de la conductivité électrique (CE). L'utilisation des ions majeurs nous permet de déterminer les différents faciès et de voir leur évolution spatiale et temporelle. Cette étude repose pour l'essentiel sur les deux paramètres que sont la conductivité électrique et la teneur en chlorure. Le paramètre conductivité, qui renseigne sur la salinité est considéré comme le meilleur traceur d'une intrusion saline. L'ion chlorure ( $\text{Cl}^-$ ) est considéré comme l'un des marqueurs les plus conservatifs dans les environnements aqueux naturels ; il ne participe pas aux réactions d'oxydo-réduction, ni ne forme de précipités insolubles [16].

La comparaison des cartes de salinité de 2000, 2012 et 2015 montre la même morphologie, mais avec une augmentation dans le temps de la CE dans la partie longeant le littoral et celle longeant le fleuve Saloum. L'accroissement de la conductivité

est naturellement dirigé vers les environs salés et présente un net resserrement des courbes d'isolateurs sur les deux derniers kilomètres de ces zones (Figure 3).

Du côté de la mer, au niveau des ouvrages les plus affectés, les conductivités ont presque doublé entre 2000 et 2015 passants de  $4000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  à  $9000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  (puits Soukouta). Vers le Nord, cette augmentation est moins marquée avec une augmentation de  $500 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  sur les 15 dernières années et ceci pour les ouvrages les plus proches du fleuve Saloum (9, 32, 34). La comparaison des cartes montre une avancée de l'isovaleur 500 à l'intérieur des terres surtout dans le secteur Sud-ouest (ouvrage 19 et 23), tandis qu'au Nord l'isovaleur 500 atteint aujourd'hui la partie centrale de la région, où l'eau avait en 2000 une conductivité de moins de  $250 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  (figure 3).

Le suivi de l'évolution de la salinité des eaux souterraines au sein de l'aquifère côtier est aussi fait en utilisant les teneurs en chlorure au niveau des ouvrages se trouvant le long de la ligne de côte (figure 4) et d'autres perpendiculaires à cette même ligne (tableau 1). Ceci va permettre d'une part de suivre l'avancée du biseau salé par rapport à l'exutoire et d'autre part d'évaluer l'ampleur de la pénétration du biseau à l'intérieur des terres.

**Tableau 1.** Résultats des analyses chimiques des eaux de la nappe en avril 2015 (concentration en mg/l)

N°	Nom	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	pH	T°C	CE (μS/cm)	TDS (mg/l)
1	Koumbal	15,058	3,026	50,940	1,092	30,5	59,55	1,22	45,00	7,5	28,70	413,0	206,00
2	Sikatoroum	38,675	6,553	8,525	5,311	146,4	24,63	1,95	0,00	6,9	29,70	365,0	232,00
3	Some	24,477	2,147	17,847	4,571	91,5	12,90	3,72	1,29	7,4	29,50	318,0	158,00
4	Touba Darou camp,	81,864	2,712	10,684	1,160	274,5	40,51	2,34	0,00	7,3	30,17	589,0	414,00
5	Ndobene	6,628	1,343	22,631	0,574	15,25	42,59	0,00	0,00	6,9	31,10	199,0	89,00
6	Daga Youndou	17,965	1,619	14,276	0,357	59	36,63	0,00	0,00	6,4	29,70	230,0	130,00
7	Latmingué	90,276	13,946	60,879	109,798	241	280,04	49,46	3,73	7,6	27,90	1530,0	849,00
8	Keur Mamour Lo	21,418	0,648	5,645	0,076	22,35	43,88	1,38	1,33	6,2	27,60	309,0	97,00
9	Koilal	69,767	57,358	1150,744	3,120	23,79	1844,87	64,53	25,88	5,5	28,70	2940,0	3240,00
10	Ndramé Scale	19,492	0,415	8,080	1,222	60,98	7,24	0,00	0,00	5,4	31,90	75,8	98,00
11	Ndramé Ibra	4,419	2,592	42,177	1,332	6,1	39,29	0,00	52,01	6,5	27,90	314,0	148,00
12	Diaglé	14,621	4,034	81,599	2,549	10,98	138,27	30,51	0,00	6,0	28,60	897,0	283,00
13	Soukouta	558,140	217,736	1297,103	28,861	298,9	2926,76	0,00	40,50	7,5	27,80	9000,0	5368,00
14	Néma Ba	100,069	24,282	157,314	85,785	1,22	291,07	434,57	0,00	3,6	29,10	1770,0	1100,00
15	Missira 1	107,724	12,906	85,016	35,303	103,7	241,49	97,33	11,40	7,1	26,90	1700,0	695,00
16	Missira2	4,861	0,463	9,117	0,182	24,4	11,25	1,26	0,00	6,7	28,00	96,3	52,00
17	Néma Nding	20,339	6,210	58,065	2,580	1,52	110,31	0,00	26,70	4,5	27,1	667,0	226,00
18	Dassilamé Socé	2,635	0,234	6,041	0,789	18,3	4,48	0,74	0,00	5,9	29,20	70,9	33,00
19	Karang	58,783	13,219	88,364	1,290	170,5	118,55	0,00	44,62	7,6	31,10	1040,0	495,00
20	Sirmang	0,516	0,006	5,599	0,000	10,98	4,87	0,00	0,00	6,0	30,00	47,3	22,00
21	keur Samba Gueye	1,764	0,790	9,359	0,190	12,2	8,66	0,00	1,47	7,2	29,70	163,0	44,00
22	keur Seyni Guèye	22,034	20,224	98,562	2,150	0,915	142,95	0,00	110,93	3,7	28,90	1210,0	402,00
23	Keur Momar Sokhna	7,674	0,291	16,562	0,218	10,98	3,74	5,58	35,50	5,7	29,30	156,0	81,00
24	Bambadalo Thiakho	0,770	3,395	21,394	1,980	9,1	23,46	0,00	25,66	5,6	28,50	222,0	86,00
25	keur Lahine Fatim	3,605	0,287	30,033	0,323	17,03	16,55	0,34	31,68	5,8	27,50	219,0	100,00
26	Nioro Alassane Tall	39,484	6,751	6,809	0,486	143,35	4,23	1,89	0,00	7,9	27,00	438,0	203,00
27	Keur Saloum Diané	0,300	0,400	5,610	0,781	6,1	5,35	0,34	0,00	5,2	27,50	47,1	19,00
28	Lamaram Badiane	66,414	1,866	9,317	7,910	140,3	76,88	2,60	3,38	7,1	27,50	762,0	309,00
29	Ndiagne	17,035	3,275	16,860	0,827	68,625	29,63	2,52	0,00	6,9	26,40	259,0	139,00
30	Ndiakhate	10,897	0,733	4,945	1,535	36,6	8,51	1,08	0,00	7,8	32,80	145,0	64,00
31	Sama Toucouleur	52,442	8,913	23,790	2,231	231,8	53,29	2,39	1,46	7,1	30,70	652,0	376,00
32	Dabane Galadio	98,690	37,233	665,761	2,644	27,45	1303,78	142,75	0,00	6,5	28,30	3570,0	2278,00
33	Tiofior	18,828	2,140	65,489	2,300	3,66	161,27	2,63	1,83	4,9	27,50	689,0	258,00
34	Bandoulou Touc,	235,172	20,516	326,708	7,295	55,4	1107,70	16,31	0,00	7,2	29,30	3290,0	1769,00
35	Tallène	11,525	1,212	11,079	0,630	32,025	23,73	1,08	0,00	6,1	30,10	172,0	81,00
36	Lérane Kolli	26,483	2,801	14,441	2,743	83,875	40,51	2,39	1,23	6,8	28,00	356,0	174,00
37	Ndiaye ndiaye Sérère	86,345	4,537	45,675	7,168	1,83	288,94	4,22	0,00	5,1	28,90	940,0	439,00

38	Sorom1	11,310	2,933	97,477	2,656	3,66	163,57	4,61	3,47	5,6	30,00	820,0	290,00
39	Thianda Thiamène	100,828	5,621	103,960	5,288	43,55	251,18	6,35	40,67	6,1	29,30	1640,0	557,00
40	Keur Mat Thiam	2,267	0,123	29,186	0,225	30,86	23,69	0,00	1,05	6,0	28,60	190,0	87,00
41	Passi Diémoul	15,686	4,460	35,929	1,264	17,08	47,90	0,00	38,40	7,1	29,70	396,0	161,00
42	Keur Madiabel	36,966	3,721	82,453	1,393	65,575	200,74	12,34	0,00	6,5	29,60	850,0	403,00
43	Koular	6,483	2,397	16,130	20,451	13,42	61,61	2,43	1,63	6,4	28,40	385,0	125,00
44	Koutango	6,628	1,619	4,291	1,498	18,81	8,59	1,20	0,00	6,2	27,00	104,0	43,00
45	Keur Maba Diakhou	6,911	1,005	10,876	0,235	24,5	8,13	0,00	10,86	7,4	31,40	111,0	63,00
46	Keur Moussa Poste	3,690	0,951	6,413	0,470	18,3	5,75	0,00	0,00	5,9	32,20	69,5	36,00
47	Porokhane	4,651	1,857	10,070	0,172	10,355	17,36	0,00	1,27	5,5	31,00	131,0	46,00
48	Niouro du Rip	14,826	4,219	5,200	0,579	58	6,24	22,53	0,00	6,7	30,60	191,0	112,00
49	Paoskoto	80,759	2,836	9,911	0,395	222,65	9,14	8,11	0,00	7,8	32,30	398,0	334,00
50	Taiba Niassene	16,104	1,076	3,011	0,015	50,325	3,65	0,99	0,00	6,5	31,00	113,0	75,00

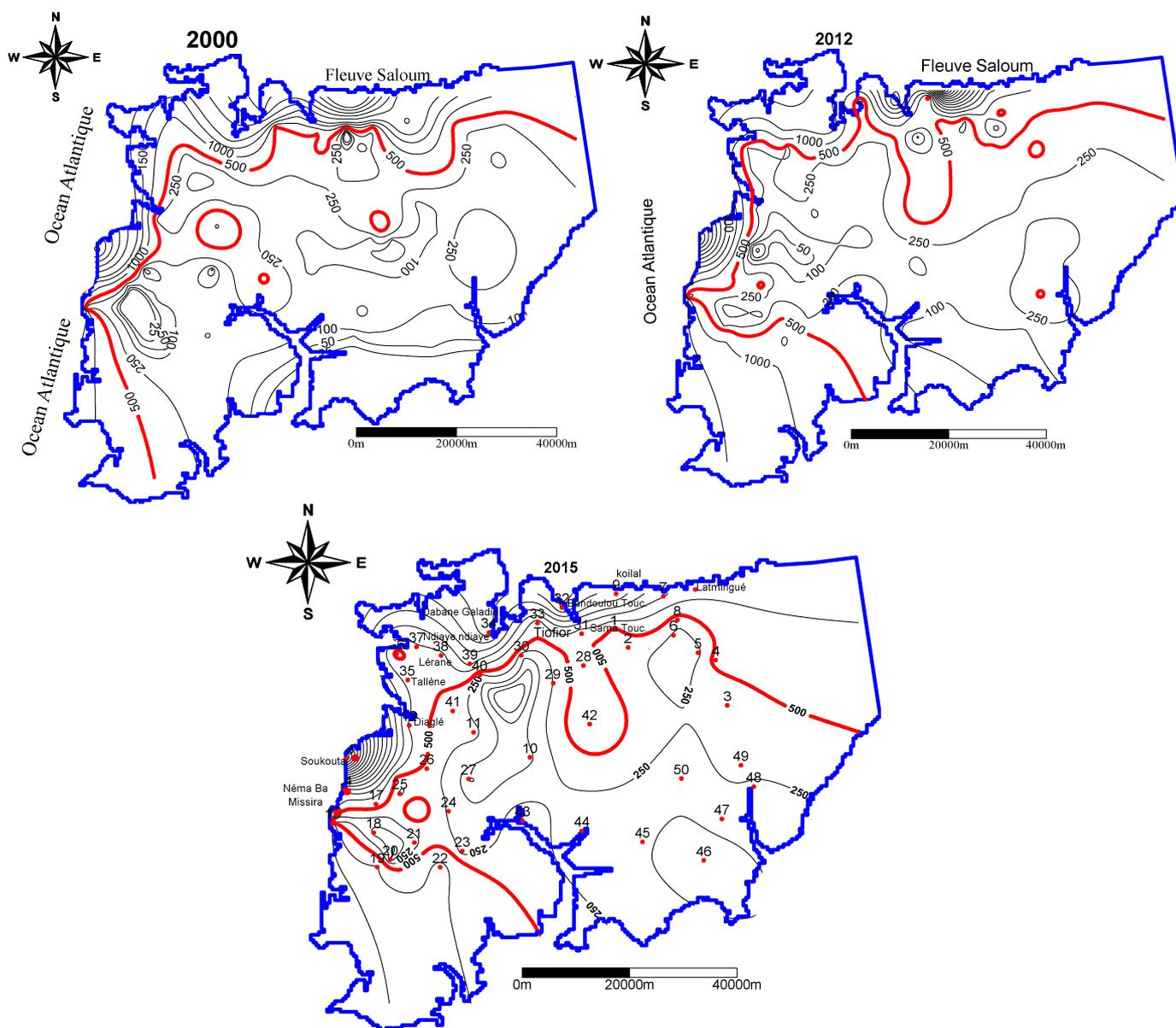
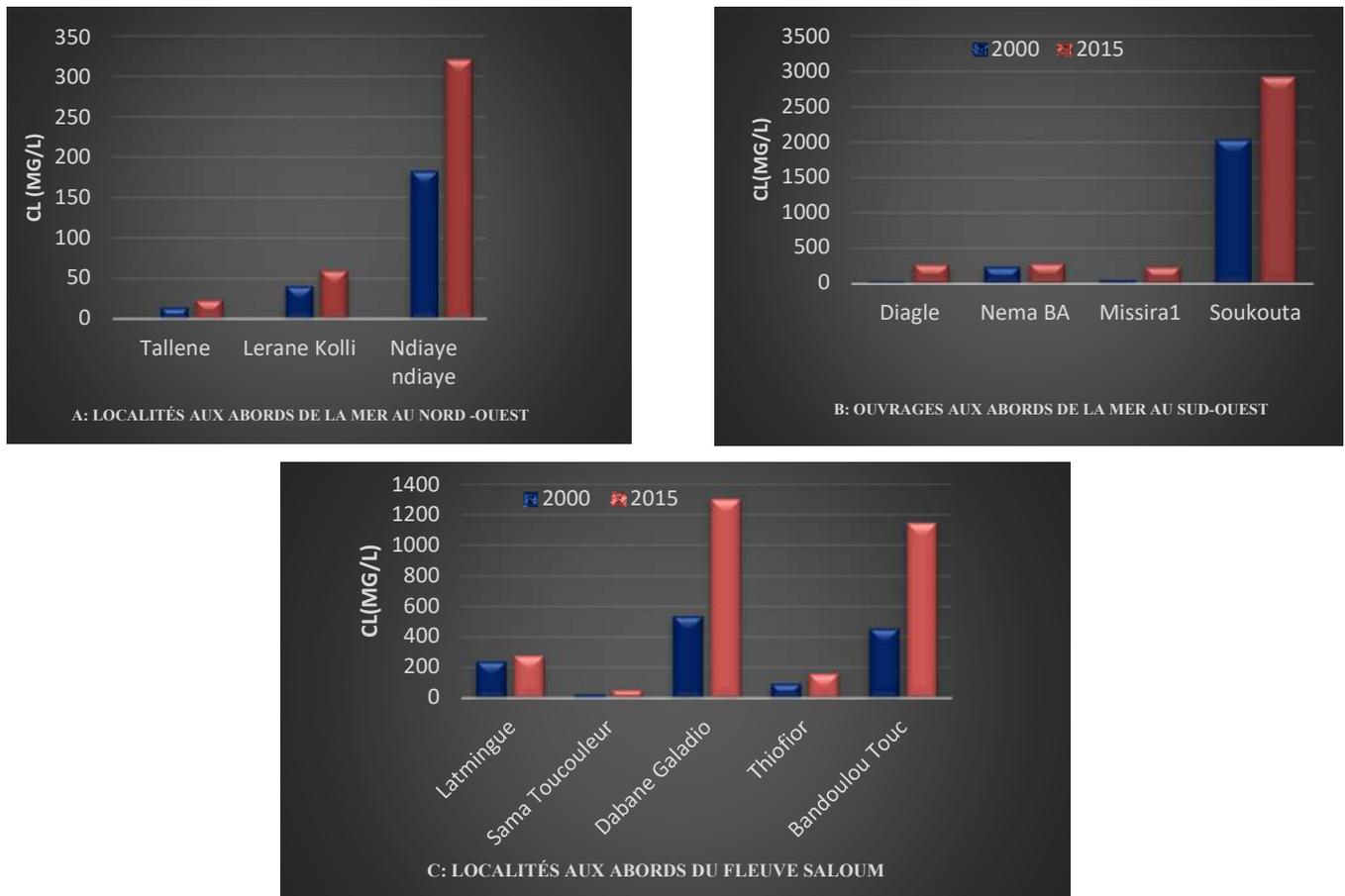


Fig. 3. Répartition spatiale de la conductivité électrique ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) en avril 2000, mai 2012 et avril 2015.

L'analyse des teneurs en chlorure, un des constituants majeurs de l'eau de mer, bon *marqueur* de l'intrusion saline dans les nappes côtières [17], [18], [19], [20] montre que la nappe a enregistré au cours des quinze dernières années une augmentation de la salinité pour les points d'eau situés le long du littoral tout près de la mer et les points situés au Nord dans les environs du fleuve Saloum.

Dans la partie Nord-Ouest, les eaux de la nappe sont moins affectées par l'entrée de l'eau salée. Toutefois, bien qu'apparemment plus lente dans ce secteur, l'évolution de la concentration en chlorure croît régulièrement au cours des années. Ceci est plus manifeste sur l'ouvrage de Ndiaye Ndiaye (figure 4 A).



**Fig. 4. Evolution des teneurs en chlorures au niveau des ouvrages sur une ligne parallèles à la côte**

Les puits proches de la mer qui, dans les années 2000, présentaient des teneurs en chlorure inférieures à 50 mg/l (Diagle (12) et Missira1(15)) montrent actuellement des valeurs de près 300 mg.L<sup>-1</sup> (figure 4 B). Pour la localité de Soukouta (13), l'augmentation est considérable et atteint 1000 mg.L<sup>-1</sup> de chlorure (figure 4 B). Aux abords du Saloum, l'ampleur est moindre que dans la partie Sud-Ouest, avec une augmentation d'environ 20% à Latmingué (7) et pour les localités voisines (Dabane Galadio (32), Thioffior (33) et Bandoulou (34)), la concentration en chlorure a dépassé même le double de celle obtenue en 2000.

L'intrusion saline a pris de l'ampleur au cours des années. Elle s'est manifestée par une avancée à l'intérieur des terres et une augmentation de la salinité au niveau des ouvrages proches de la mer et du fleuve Saloum (Tableau 2).

Ce phénomène de salinisation se manifeste de manière différente d'un point à l'autre entre 2012 et 2015. Ceci peut être dû aux variations de la lithologie et/ou au stress anthropique appliqué à l'aquifère.

Tableau 2. Evolution des teneurs en chlorures en fonction de la distance par rapport à la mer

Localités	Distance (m)/mer	Cl (mg/l) en 2012	prof (m) 2012	Cl (mg/l) en 2015	prof (m)
Missira 1	388	<b>232,86</b>	6,45	<b>241,5</b>	6,4
Missira 2	648	<b>14,25</b>	8,35	<b>11,25</b>	8,6
Néma BA	61	<b>275,86</b>	2,87	<b>291,07</b>	3,1
Néma Ding	5994	<b>102,08</b>	9,71	<b>96,31</b>	9,4
K lahine	10590	<b>15,76</b>	20	<b>16,5</b>	19,9
K Aliou DIOP	14490	<b>53,27</b>	17,7	<b>67,1</b>	17,4
Ndiaye Ndiaye	730	<b>282,79</b>	3,77	<b>288,94</b>	2,7
Sorom	5240	<b>196,4</b>	6,35	<b>163,57</b>	6,5
Thianda Thiamen	10700	<b>98,4</b>	6,21	<b>151,18</b>	5,2
K Math Thiam	14320	<b>27,99</b>	8,6	<b>23,69</b>	6,7

La représentation graphique à charge équivalente de l'évolution des teneurs en sodium en fonction des concentrations en chlorures (figure 5) montre que :

- les points situés sur la droite 1:1 correspondent à l'eau des ouvrages localisés à proximité des environnements salés. Ceci indique un mécanisme de mélange entre une eau douce et une eau salée, sans qu'il y ait de réaction d'échange d'ions ;
- les points d'eau situés sous la droite 1:1 se trouvent dans un domaine d'appauvrissement en sodium. Cette caractéristique est typique des eaux dont la chimie est contrôlée par des réactions d'échange cationique ;
- les points situés au-dessus de la droite 1:1 indiquent que les eaux ont un excès de sodium. Cela implique que l'origine de cet ion ne s'explique pas complètement par un équilibre Na vs Cl.

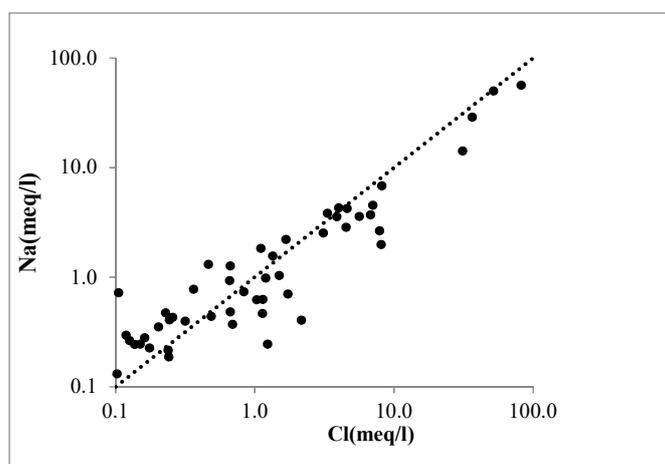


Fig. 5. Relation  $Na^+$  et  $Cl^-$

Étant donné que la teneur en sodium devrait équilibrer la teneur en chlorure, le déficit en  $Na^+$  ne peut être expliqué dans notre cas que par un phénomène d'échange ionique inverse entre l'eau et l'aquifère i.e. par l'adsorption de  $Na^+$  et la libération de  $Ca^{2+}$  au niveau des zones salées. Dans certaines eaux où un excès de  $Na^+$  est noté, une autre source doit être recherchée, qui pourrait être l'altération de feldspaths sodiques. Le contact des eaux salées avec les argiles peut expliquer les fortes concentrations de  $Na^+$  et  $Cl^-$  dans les eaux de la nappe au niveau de ces environs salés du fait que les argiles ont une perméabilité réduite et une forte capacité d'échange cationique [21]. Les eaux en contact avec ces dépôts argileux peuvent se charger en ces éléments sous l'effet de leur concentration élevée (action de la force ionique des solutions).

L'étude de la variation de la salinisation a été aussi réalisée par la caractérisation des faciès géochimiques des eaux avec l'utilisation du diagramme de Piper. Les faciès identifiés au niveau de la zone sont au nombre de trois : bicarbonaté ( $CaHCO_3$ ,

et  $\text{CaNaHCO}_3$ ); chloruré ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaMgCl}$ ,  $\text{CaCl}$ ) et sulfaté ( $\text{NaKSO}_4$ ) pour le seul ouvrage de Néma (14). Les faciès sont de type chloruré, près la côte et dans les environs du Saloum et de ses affluents méridionaux, ce qui souligne bien l'influence des eaux salées loin dans l'intérieur des terres et dans certaines parties de la zone d'étude. Sur certains ouvrages 12, 32, 13, 38 et 9, la salinisation s'accroît avec une augmentation des teneurs en Na et Cl matérialisé sur le diagramme de Piper par la migration de ces points vers le sommet (figure 6).

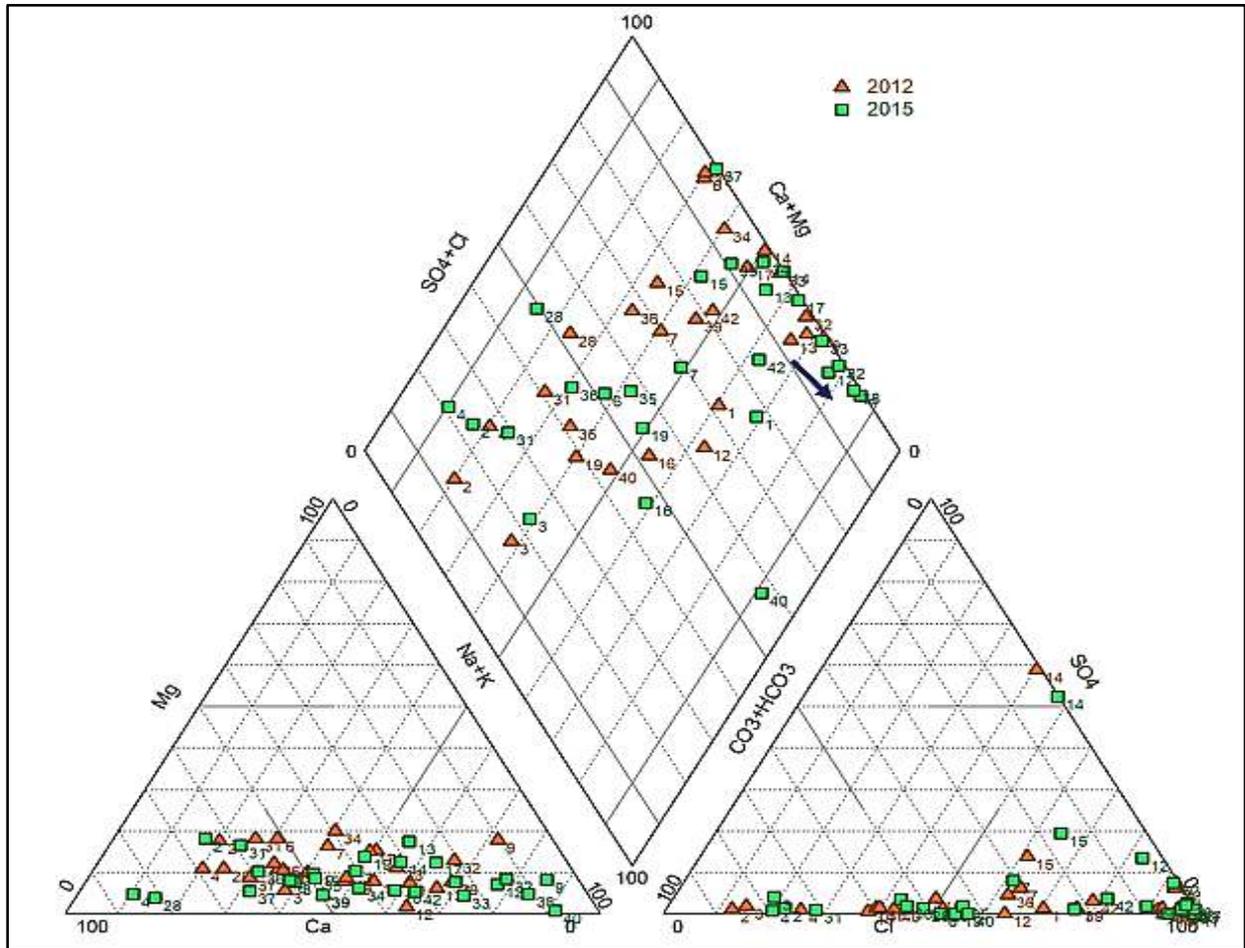


Fig. 6. Faciès des eaux de la nappe en mai 2012 et avril 2015

Des changements de faciès sont notés entre 2012 et 2015 (figure 6) ; certains ouvrages 34, 36, 7, 39 ont évolué dans le temps depuis un faciès chloruré calcique vers un faciès chloruré sodique et d'autres passent d'un faciès bicarbonaté calcique vers un faciès chloruré calcique (35, 40, 19) ce qui corrobore le processus d'une intrusion saline. A l'intérieur des terres, les faciès bicarbonatés au niveau des ouvrages 42 et 28 en 2012 ont changé pour donner un faciès chloruré. Ces changements de faciès montrent une augmentation des concentrations de chlorure due essentiellement à l'influence des eaux salées environnantes.

L'augmentation de la salinité des eaux souterraines associée à un faciès chloruré sodique peut provenir de l'action conjuguée de différents mécanismes, comme une concentration par évaporation ou un mélange avec une eau de mer ou avec une saumure [22]. Du fait de la proximité de ces ouvrages aux environnements salés, l'influence de l'eau de mer et du fleuve Saloum sur les eaux de la nappe est retenue comme étant la cause principale.

## 5 CONCLUSION

Ce travail nous a permis de voir l'évolution de la salinité des eaux souterraines dans le temps et dans l'espace. La distribution spatiale de la conductivité électrique des eaux souterraines ainsi que leur évolution spatio-temporelle ont été cartographiées. Il ressort de cette étude que les valeurs de conductivité électrique et les teneurs en chlorure ont doublé entre 2000 et 2015 au niveau des secteurs ouest, sud-ouest et nord de l'aquifère du Saloum avec des concentrations qui s'accroissent vers l'intérieur

des terres. L'apparition de faciès chloruré calcique au droit de certains ouvrages proches de la mer et des environs du fleuve Saloum est manifeste. Des changements de faciès sont notés aussi dans certains ouvrages allant du bicarbonaté au chloruré. Cette augmentation des teneurs en chlorure pourrait être à l'origine d'une altération de la qualité de l'eau souterraine et va avoir des conséquences néfastes sur l'usage domestique et agricole car 3 à 4 % d'eau de mer additionnées à l'eau douce suffit à la rendre impropre à la consommation [23]. Cette étude montre donc la nécessité de continuer la recherche pour une meilleure gestion de la ressource avec un suivi du processus actuel de salinisation des eaux et l'évaluation de la charge de chlorure dans les zones bordières.

## REFERENCES

- [1] 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. Thèse es Sciences. Univ. Cheikh Anta Diop de Dakar 153 p, 2005.
- [2] Noël, Y., Etude hydrogéologique du Continental Terminal de Sine Gambie première phase et rapport de synthèse, BRGM DKR 75 DK 05, 30 P, 1975.
- [3] Diluca, C., Etude hydrogéologique du Continental Terminal entre le Sine et la Gambie Deuxième phase et rapport de synthèse, BRGM DKR 76 DK 33p, 1976.
- [4] Faye, S., Faye, S.C., Ndoye, S., and Faye, A., Hydrogeochemistry of the Saloum (Senegal) superficial coastal aquifer. International journal of Geoscience environmental geology volume 44 N° 2.pp. 127-136, 2003.
- [5] Faye, S., Maloszewski, P., Stichler, W., Trimborn, P., Cisse Faye, S. and Gaye, C.B., Groundwater salinization in the Saloum (Senegal) delta aquifer: minor elements and isotopic indicators. Sci. Total Environ, 343 : 243-259, 2005
- [6] Diop, EL. S., Estuaires holocènes tropicaux. Etude géographique physique comparée des rivières du sud : du Saloum (Sénégal) à la Mellacorée (République de Guinée). Thèse d'état lettre Univ. L. Pasteur Strasbourg, tome I. 522 p., 1986.
- [7] Khammari, B. et De Marsily, G., Identification de l'intrusion marine en nappe côtière par co-krigeage entre les teneurs hydrochimiques (Nappe alluviale du bas Sebou, Algérie), rapport, 18 p., 1994.
- [8] Marjoua. A., Olive, P. and Jusserand, C., 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 / Journal of Water Sciences, vol. 10, n° 4, pp. 489-505, 1997.
- [9] Held, R., Attinger, S. and Kinzelbach, W., Homogenization and effective parameters for the Henry problem in heterogeneous formations. *Water Resources Research*, 41(W11420): 1-14, 2005.
- [10] Lappartient, J. R., 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, 272 p 10 pl. photo, 1985.
- [11] Flicoteaux, R. et Lappartient. J.R., 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. 28 p. 1972.
- [12] Elouard, P., Formations sédimentaires de Mauritanie atlantique. In : "Notice explicative de la carte géologique à 1/1000 000 de la Mauritanie".B.R.G.M. éd., pp. 171-233, 1975.
- [13] Faye S., Etudes hydrogéologiques et hydrologiques complémentaires de la nappe du Continental Terminal dans la zone Sine-Gambie. Rapport géophysique. Projet PEPAM-BAD, 2017.
- [14] Ndoye S., Comportement hydrodynamique et hydrochimique de la nappe côtière du Continental Terminal du Saloum. Thèse 3eme cycle Univ. Cheikh Anta Diop de Dakar, 152 p. Ndoye, 2003.
- [15] Ndoye, S., Razack M., FAYE S. et GAYE, C. B., Application des méthodes statistiques multivariées et de la classification de Stuyfzand pour la caractérisation des eaux souterraines de l'aquifère côtier du Saloum, Sénégal, Afrique SCIENCE 13(2) (2017) 200 -212, ISSN 1813-548X, 2017.
- [16] Fetter, C.W., Applied Hydrogeology. Prentice Hall Inc., New Jersey (USA), 691p, 1994.
- [17] Back, W., Hydrochemical facies and groundwater flow patterns in northern part of Atlantic Coastal Plain. USGS Professional Paper 498-A. US Government Printing Office, Washington, 42p. 1966.
- [18] Howard K.W.F. and Lloyd K.W., Major ions characterization of coastal saline Groundwaters. *Groundwater* 21 (4), 429-437, 1983.
- [19] Mercado, A., The use of hydrogeochemical patterns in carbonate sand and sandstone aquifers to identify intrusion and flushing of saline water. *Groundwater* 23: 635-645, 1985.
- [20] Tellam, J.H. and Lloyd, J.W., Problems on the recognition of seawater intrusion by chemical means: An example of apparent chemical equivalent. *Quaternary Journal of Engineering Geology* 19: 389-398, 1986.

- [21] Schoeller, H., Les eaux souterraines, Ed. Masson, Paris. 1962,
- [22] Barbecot, F., Approche géochimique des mécanismes de salinisation des aquifères côtiers -Chronologie 14 C- 226 Ra. Thèse- Doctorat de l'université Paris XI, 1999.
- [23] Custodio, E., Coastal aquifers as important natural hydrogeological structures, in Groundwater and human development, editors: Bocanegra E.M., Hernández M.A., Usunoff E., pp. 15–38, 274 p., Taylor & Francis, London, UK, ISBN 987-544-063-9, 2005.