

Caractérisation hydrogéologique du bassin versant côtier de la région de Mboro, zone des Niayes (Sénégal)

Auteur : Julémont, Marine

Promoteur(s) : Brouyere, Serge

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences géologiques, à finalité approfondie

Année académique : 2018-2019

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/7300>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Faculté des Sciences

Département de Géologie

Promoteur du mémoire : Dr. Serge BROUYERE

Université de Liège

*Caractérisation hydrogéologique du bassin versant
côtier de la région de Mboro, zone des Niayes
(Sénégal)*

Par

Marine JULEMONT

Master en sciences Géologiques, à finalité approfondie

Année académique 2018-2019

Remerciements

Premièrement, je tiens à remercier l'Académie de recherche et d'enseignement supérieur de la Fédération Wallonie-Bruxelles, Belgique, dans le cadre de sa politique de Coopération au développement dont la mission au Sénégal a été rendue possible grâce à leur soutien financier.

Je souhaite ensuite remercier mon promoteur, Mr. Brouyère de m'avoir permis de réaliser cette étude de terrain au Sénégal. Je remercie également Philippe Orban pour son aide et son attention.

J'aimerais remercier toutes les personnes m'ayant aidées lors de mon travail de terrain, Dior Diallo, Aziz Gning, Joost Wellens, Johan Derouane et le personnel de la DGPRES pour leur accueil à Dakar.

Merci aussi à Joël Otten, technicien chimiste au laboratoire du département de géologie de l'Université de Liège, pour l'ensemble des analyses effectuées et l'ensemble de ses explications.

Ensuite, je tiens à porter une attention particulière à mes chers amis, Camille Baudinet, François Warichet, Juan Boccardo, Christophe Dijckmans, et tous les autres, pour leur soutien dans les moments les plus durs, leur aide, encouragements et tout le reste.

Merci aux belles rencontres faites à Thiès, Simon, Alexia, Sean et Youri, qui a rendu ce voyage unique.

Et pour finir, merci à ma famille pour leur aide apportée durant la réalisation de ce mémoire mais surtout merci pour leur patience et leurs nombreux encouragements durant toutes ces années d'études, d'abord à Bruxelles et ensuite à Liège. Et surtout, merci à eux, d'avoir cru en moi jusqu'au bout.

Résumé

La zone des Niayes, localisée sur la bande littorale entre Dakar et Saint-Louis, concentre plus de 80% des surfaces maraichères du pays. Cette région côtière du Sénégal est caractérisée par un climat sub-canarien, dominé par une faible pluviométrie, une saison des pluies de juin à septembre, et des températures élevées tout au long de l'année.

L'absence de cours d'eau pérenne fait de la nappe la principale source en eau. Les enjeux quant à la gestion de la qualité et de la consommation de cette nappe sont nombreux. L'objectif de ce travail est de caractériser cette nappe au niveau des communes de Darou Khoudoss, Taiba Ndiaye et Méouane situées dans la région de Thiès afin d'améliorer les connaissances et d'en améliorer la gestion. Une étude piézométrique et des recherches hydrochimiques classiques combinées à l'analyse de statistiques multivariées ont été appliquées.

L'étude de la dynamique de la nappe a permis de modéliser le sens d'écoulement des eaux de l'Est vers l'Ouest, avec un dôme piézométrique au niveau de la commune de Taiba Ndiaye et un rabattement de la nappe au niveau de la mine de phosphate des ICS au centre de la zone d'étude. L'analyse hydrochimique a permis de déterminer le faciès chloruré, calcique, sodique et potassique des eaux souterraines. L'étude approfondie de la nappe d'eau a montré la présence d'une avancée du biseau salin à l'intérieur des terres et une contamination en nitrate, phosphate et sulfate pour certains ouvrages localisés à proximité des surfaces agricoles.

Abstract

The Niayes zone, located on the coastal strip between Dakar and Saint-Louis, concentrates more than 80% of all agricultural land of the country. This coastal region of Senegal is characterised by a sub-Canarian climate, dominated by a low rainfall with rainy season from June to September, and high temperatures throughout the year.

The lack of a permanent watercourse makes the water table the main source of water. Water management and consumer about this groundwater have many issues. The objective of this study is to characterize the level of the table water of the communes of Darou Khoudoss, Taiba Ndiaye and Meouane, in the Thies region, in order to improve knowledge and management. A piezometric study and classical hydrochemical research combined with multivariate statistics analysis were applied.

The study of the groundwater dynamics allowed to model the direction of flows water from East to West, with piezometric dome in the Taiba Ndiaye commune and a drawdown in the ICS phosphate mine zone, in the center of the study area. The hydrochemical analysis allowed to determine the Chloride, Calcium, Sodium and Potassium facies of the groundwater. The comprehensive study has shown the presence of the advance of marine intrusion into the land as well as Nitrate, Phosphate and Sulfate contamination located near the agricultural surfaces.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Zone d'étude	2
2.1	Localisation	2
2.2	Contexte climatique	2
2.3	Contexte pédologique et géologique	4
2.4	Contexte géomorphologique et structural	8
2.5	Contexte hydrogéologique	10
2.6	Contexte industriel et agricole	12
3	Matériels et méthodes	14
3.1	Topographie	14
3.2	Paramètres physico-chimiques des eaux souterraines	15
3.3	Notions théoriques	16
3.3.1	Diagrammes	16
3.3.2	Indices de saturation	17
3.3.3	Échanges ioniques	18
3.3.4	Self-Organizing Maps (SOM's)	19
4	Résultats	21
4.1	Acquisition des données	21
4.2	Traitement des données	22
4.2.1	Potentiométrie	22
4.2.2	Chromatographie ionique	23
4.2.3	Spectrométrie d'absorption atomique	24
4.3	Caractérisation hydrodynamique	25
4.3.1	Carte piézométrique	25
4.3.2	Suivi piézométrique de la zone au cours du temps	26
4.4	Caractérisation hydrochimique	27
4.4.1	Hydrochimie générale	27
4.4.2	Origine de la salinité	38
4.4.3	Processus d'alcalinisation	41
4.4.4	Analyse des SOM's	41
5	Discussion	45
6	Conclusion et perspectives	48
7	Bibliographie	50
8	Annexes	59

Table des figures

Figure		Page
1	Localisation de la zone des Niayes (en jaune) et de la zone d'étude (en vert) au Sénégal.	2
2	Moyennes des températures et précipitations à Saint-Louis des 5 dernières années entre avril 2014 et mars 2019 (à partir de (S.L, p. d.)) avec en bleu : les précipitations ; en rouge : les températures.	3
3	Contexte pédologique de la zone des Niayes (modifié d'après Sall, 2010).	5
4	Log stratigraphique théorique de la zone des Niayes.	7
5	Contexte géomorphologique et hydrogéologique de la zone des Niayes (inspiré de (Pezeril et al., 1986) tiré de (Sall, 2010)).	9
6	Aquifères de la zone des Niayes (d'après DGPRES, 2014).	11
7	Schéma théorique du fonctionnement d'un GPS différentiel (inspiré de <i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>).	14
8	Nivellement au GPS différentiel lors de la campagne de terrain de mars 2019 dans les communes de Darou Khoudoss, Taïba Ndiaye et Méouane ; avec en a) la station GPS fixe de référence localisée précisément sur le point géodésique RRS2 030 (agrandissement en (b)) ; et en c) la station GPS mobile localisée sur un point de repère (agrandissement en (d)).	15
9	Mesure des paramètres physico-chimiques avec la sonde mutli-paramétrique Hach-HQ40d ; avec en a) deux sondes (parmi les 4) permettant de mesurer les paramètres physico-chimiques disposée dans l'échantillon d'eau du puits à analyser ; en b) l'ensemble de l'appareil, les sondes et le dispositif de prise de mesures et en c) le dispositif de mesure, avec les valeurs des paramètres physico-chimiques s'affichant sur le cadran. Photos prises lors de la campagne de mars 2019 sur la zone d'étude.	16
10	Échanges ioniques en cas d'intrusion saline et de rafraîchissement.	18
11	Algorithme des SOM's (a = Répartition des vecteurs de référence ; b = Mesure de la distance Euclidienne par calcul ; c = Mise à jour des vecteurs de référence par rapport à la valeur de son voisin N(t).	20
12	Localisation des différents puits établis durant la campagne de mars 2019 ainsi que les ouvrages du suivi de décembre de 2018 de la DGPRES.	21
13	Carte piézométrique théorique de la zone d'étude ; avec en jaune : mesures prises en décembre 2018 par la DGPRES ; en bleu : mesures prises en mars 2019.	26
14	Matrice de corrélation linéaire entre les éléments majeurs, avec en bleu, les corrélations positives, et en orange les corrélations négatives. Au plus, l'ellipse est fine, au plus il y a de corrélation.	28
15	Répartition spatiale a) des processus d'oxydo-réduction ; b) du pH ; c) de la conductivité électrique ; des eaux souterraines de la zone d'étude.	31

16	Répartition spatiale a) du phosphate ; b) du nitrate ; c) du sulfate ; d) du chlorure ; e) de l'ammoniaque ; f) du fer ; des eaux souterraines de la zone d'étude.	32
17	Diagramme de Piper de l'ensemble des échantillons de la zone d'étude de la campagne de mars 2019.	33
18	Diagrammes de Stiff localisés sur la région de Mboro.	34
19	Diagrammes de Stabler localisés sur la région de Mboro.	34
20	Indices de saturation pour chaque échantillon, avec en vert clair, la zone d'équilibre des minéraux en solution.	35
21	Diagramme de comparaison des indices de saturation de la calcite (ISC) en fonction des indices de saturation de la dolomite (ISD) avec en rouge : la droite d'équilibre entre ISC et ISD ; en vert : les eaux plus âgées ; en orange : les eaux plus récentes. . .	36
22	Diagramme d'échanges de bases de $(Ca^{2+}+Mg^{2+})-(SO_4^{2-}+HCO_3^{-})$ en fonction de $(Na^{+}+K^{+})-(Cl^{-}+NO_3^{-})$; avec en rouge, la ligne de pente -1 ; en bleu clair : la direction de la composition de l'eau de mer.	38
23	Diagramme de Na^{+} en fonction de Cl^{-} ; avec en rouge : la droite de dissolution de la halite ; en noir : droite de mélange avec de l'eau de mer.	39
24	Origine de la salinité représentée par le diagramme du rapport de Br^{-}/Cl^{-} en fonction de Cl^{-} , avec en orange, le rapport de dissolution de la halite à 0,05% (Krimissa et al., 2004), en vert, le rapport correspondant à l'origine des eaux usées à 0,077% (Hsissou et al., 1999) ; l'aire en bleu foncé est l'intervalle 0,15% à 0,17% où la minéralisation est issue de l'eau de mer (Morell et al., 1986) et en bleu clair, lorsque le rapport est supérieur à 0,17%, il correspond à l'apport d'aérosols ou d'embruns marins (Duce et al., 1976).	40
25	Diagramme de Riverside (gauche) et diagramme de Wilcox (droite) pour les échantillons de la campagne de mars 2019.	41
26	Les SOM's en fonction de la salinité (gauche : U-Matrice subdivisée en 4 groupes ; droite : Répartition des paramètres des différents éléments appliqués par la méthode SOM's).	42
27	Les SOM's en fonction des contaminations (a = U-Matrice subdivisée en 4 groupes ; b = Répartition des paramètres des différents éléments appliqués par la méthode SOM's).	43
28	Localisation des puits en 3 dimension, afin de représenter les différences de minéralisation entre les puits.	46

Liste des tableaux

Table		Page
1	Tableau statistique des paramètres physico-chimiques.	29
2	Tableau statistique des éléments majeurs.	30
3	Résultats obtenus par la méthode des SOM's pour la salinité.	42
4	Résultats obtenus par la méthode des SOM's pour contaminations et processus d'oxydo-réduction.	43

Annexes

Annexe	Page
1 Température, humidité et précipitations des 5 dernières années entre avril 2014 et mars 2019 à Saint-Louis (S.L, p. d.).	59
2 Carte des différentes zones climatiques et variation spatiale des isoyètes du Sénégal (Malou, 2004).	60
3 Photos des différents puits étudiés dans la zone de mboro (voir localisation figure 12 page 21); avec a) puits du village de Santhie Ndong (p1); b) puits de Saw (p2); c) puits de Baiti Gueye (p3); d) puits de Keur Mabaye (p4); e) puits Yajine (p5); f) puits de Diama Tiène (p6).	61
4 Photos des différents puits étudiés dans zone de Mboro (voir localisation figure 12 page 21); avec a) puits de Sine Kane (p7); b) puits de Darou Mboye (p8); c) puits de Andal 1 (p9); d) puits de Darou Beye (p10); e) puits de Mboro-plage (p13).	62
5 Tableau de valeurs des balances ioniques.	63
6 Diagramme des coefficients de corrélation linéaire entre les éléments majeurs (en rouge = très bien corrélé (0,85 à 1,00); en orange = bien corrélé (0,70 à 0,85); en vert = corrélé (0,55 à 0,70).	63
7 Tableau de valeurs des indices de saturation; avec en bleu : sous-saturation; en jaune : sur-saturation; en vert : à l'équilibre chimique.	64
8 Code implanté dans le programme Rstudio.	65
9 Tableau des données de localisation de la zone d'étude de la campagne de mars 2019.	66
10 Tableau des paramètres physico-chimique de la campagne de mars 2019 à gauche et des analyses de laboratoire à droite.	66
11 Tableaux des données des analyses de laboratoire réalisées en avril 2019.	67
12 Tableau des données des analyses de laboratoire d'avril 2019 - Anions.	68
13 Tableau de données des analyses de laboratoire d'avril 2019 - Cations.	69
14 Valeurs de l'eau de mer prélevée dans au large de Saint-Louis (Gning, 2015).	69
15 Diagrammes de Stiff de l'ensemble des 13 échantillons de la campagne de mars 2019.	70
16 Diagrammes de Stabler de l'ensemble des 13 échantillons de la campagne de mars 2019.	70
17 Diagramme de Schoeller de l'ensemble des 13 échantillons de la campagne de mars 2019.	71
18 Diagramme de Schoeller de l'ensemble des 13 échantillons de la campagne de mars 2019 classé afin de mettre en évidence la faible concentration en $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ associé une concentration en Mg^+ moins faibles par rapport au Ca^{2+} et $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ que pour les autres échantillons.	72
19 Diagramme binaires de a) $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+$ en fonction de Cl^- et b) le rapport entre Cl^-/Br^- en fonction de Cl^-	73
20 Diagramme de Piper des échantillons colorés en fonction des groupes des SOM's liés à la salinité.	73

21	Diagramme de Piper des échantillons colorés en fonction des groupes des SOM's liés aux contaminations.	74
22	Localisation des échantillons colorés en fonction des groupes des SOM's liés à la salinité.	75
23	Localisation des échantillons colorés en fonction des groupes des SOM's liés aux contaminations.	75
24	Diagramme de Riverside (gauche) et diagramme de Wilcox (droite) pour les échantillons de la campagne de mars 2019 regroupés selon les ensembles des SOM's liés à la salinité.	76

Sigles et abréviations

ARD :	Agence Régionale de Développement
BRGM :	Bureau de Recherche pour la Géologie Minière
CSE :	Centre de Suivi Ecologique
CTB :	Agence Belge de Développement
DGPRE :	Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau
DGPS :	Système de Positionnement Global Différentiel (<i>Differential Global Positioning System</i>)
GCO :	Grande Côte Opération
GIRE :	Gestion Intégrée des Ressources en Eau
GPS :	Système de Positionnement Global (<i>Global Positioning System</i>)
ICS :	Industries Chimiques du Sénégal
MDL :	<i>Mineral Deposits Ltd</i>
MEDD :	Ministère de l'Environnement et du Développement Durable
OMS :	Organisation Mondiale de la Santé
PADEN :	Programme d'Appui au Développement Economique des Niayes
PAGIRE :	Plan d'Actions de Gestion Intégrée des Ressources en Eau
PEPAM :	Programme d'Eau Potable et d'Assainissement du Millénaire
PGE :	Plan de Gestion des Eaux
POAS :	Plan d'Organisation et d'Affectation du Sol
SAR :	Coefficient d'Absorption du Sodium (<i>Sodium Absorption Ratio</i>)
SCET :	Société Centrale pour l'Equipeement du Territoire
SEPHOS :	Sénégalaise des phosphates
SOM's :	Cartes auto-organisées (<i>Self-Organizing Maps</i>)
S-UGP :	Sous-Unité de Gestion de la Panification
UGP :	Unité Géographique de Planification
UNICEF :	Fonds des Nations Unies pour l'Enfance

1 Introduction

La zone des Niayes correspond à la bande littorale qui s'étend de Dakar à Saint-Louis au Sénégal. Cette région est stratégique pour le Sénégal vu qu'elle concentre plus de 80% des cultures maraîchères, de fruits et de légumes sur une superficie totale de 9.000 ha. Le climat régnant dans ces régions étant semi-aride, les cultures doivent être fortement irriguées. La zone de Niayes ne comptant pas de cours d'eau pérenne, la seule ressource en eau importante de la région est l'eau souterraine localisée dans les aquifères littoraux du Quaternaire. Les pressions sont multiples sur ces ressources en eau : intensification de l'agriculture, activités minières requérant de grands volumes d'eau pour les processus industriels associés, changement climatique, pression démographique croissante, salinisation de l'eau en liaison avec les pratiques agricoles et l'intrusion d'eau marine.

Quelques études régionales ont déjà été menées et ont fourni un premier état des lieux de ces ressources en eau souterraine mais les réserves en eau effectivement disponibles ne sont pas totalement connues et l'évolution de ces réserves au cours du temps reste incertaine face à ces pressions croissantes.

D'un point de vue quantitatif, les données disponibles les plus récentes indiquent une tendance à la baisse du niveau des nappes d'eau souterraine au cours des dernières décennies. Localement, l'avancée du biseau salin se fait remarquer. D'un point de vue qualitatif, les eaux souterraines sont également de plus en plus impactées par des intrants agricoles tels que le nitrate et certains pesticides. Il est donc primordial d'améliorer les connaissances relatives aux eaux souterraines de la zone de Niayes, d'en assurer un suivi temporel et de formuler des recommandations pour en améliorer la gestion.

Ce projet a été mis en place suite à une collaboration entre l'Université de Liège ainsi que la Direction de Gestion et Planification des Ressources en Eau (DGPRE). La DGPRE est responsable des enjeux liés à la gestion durable des ressources en eau avec l'élaboration du Plan de Gestion des Eaux (PGE) (DGPRE & PEPAM, 2014).

L'objectif global de ce travail vise à apporter une contribution aux connaissances des ressources en eaux souterraines dans la région de Mboro. Des objectifs spécifiques ont été définis :

- Modélisation du niveau piézométrique de nappe d'eau ;
- Décrire l'hydrochimie générale des eaux souterraines ;
- Apporter des résultats supplémentaires quant à l'avancée de l'intrusion d'eau saline ;
- Expliquer les différents phénomènes qui contrôlent la minéralisation ;

Ceci, dans le but éventuel de permettre un suivi annuel du nouveau réseau dans les communes de Darou Khoudoss, Taiba Ndiaye et Meouane et d'avoir une vision plus complète de la qualité des eaux de ces régions.

2 Zone d'étude

2.1 Localisation

Le Sénégal est délimité à l'ouest par l'océan Atlantique, au nord par la Mauritanie, à l'est par le Mali et au sud par la Guinée Bissau. La zone des Niayes est localisée entre la côte Atlantique et la Route Nationale 2 à l'est (figure 1) (DGPRES, 2014) sur une longueur de 185km (Sall, 2010) et 5 à 30km de large (A. S. Fall et al., 2001). Celle-ci est également nommée «La Grande Côte sénégalaise» (DGPRES, 2014). La superficie de cette région est de 2759km² (CSE, 2006), elle s'étend sur quatre régions (Dakar, Thiès, Louga et Saint-Louis) et sept départements (Dakar, Rufisque, Thiès, Tivaouane, Kébémér, Louga et Saint-Louis). La zone étudiée dans ce travail comprend les communes de Taïba Ndiaye, Darou Khoudoss et Méouane.

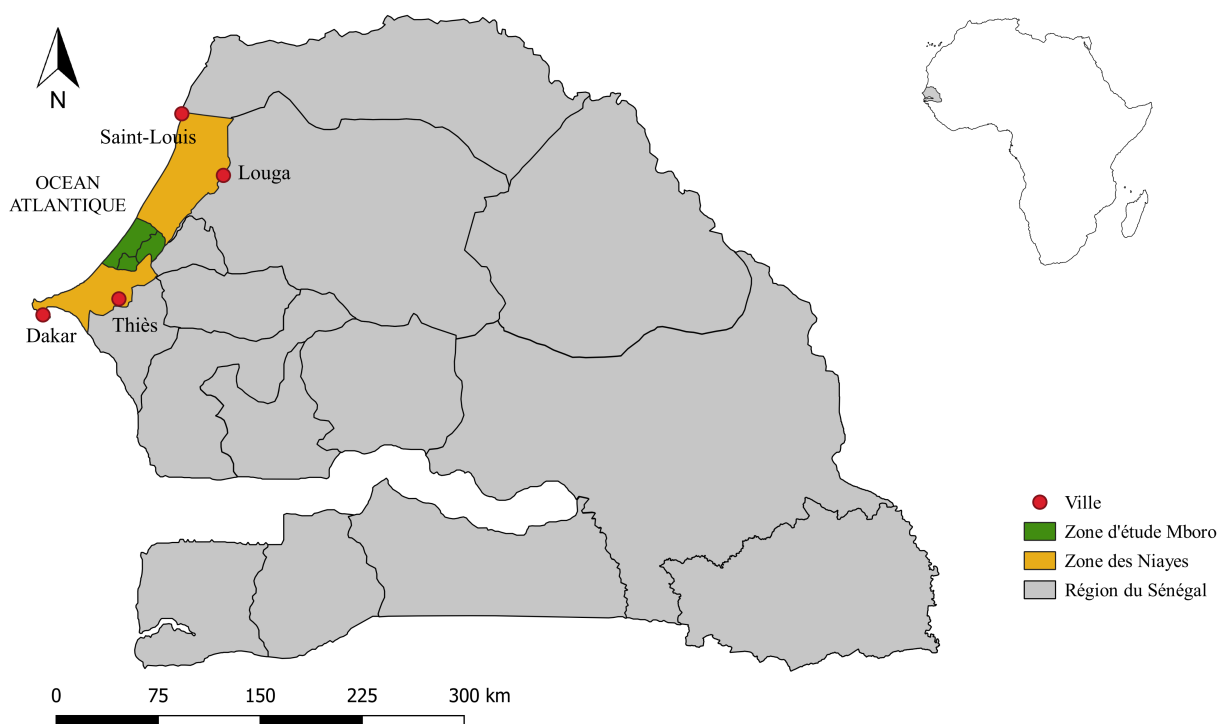


FIGURE 1 – Localisation de la zone des Niayes (en jaune) et de la zone d'étude (en vert) au Sénégal.

2.2 Contexte climatique

La zone des Niayes est affectée par un microclimat assez particulier. Le Sénégal se situe dans la zone climatique « sub-canarienne » malgré sa latitude sahélienne (Sall, 2010; Sall & Vanclooster, 2009).

L'influence des alizés maritimes joue un rôle sur les températures tempérées de la région en apportant un courant froid venant des Îles Canaries (S. Diallo et al., 2017). Les températures au centre du pays sont nettement plus élevées qu'à la côte. Pendant les périodes les plus chaudes, de juillet à octobre, la température mensuelle moyenne sur les 5 dernières années, à Saint-Louis, était de 28,71°C (S.L, p. d.). Entre novembre et juin, la température moyenne mensuelle est de 24,53°C avec des mini-

mas de 18°C de moyenne journalière (S.L, p. d.). En mai et juin, la présence de l'Harmattan, un alizé continental chaud et sec soufflant durant la journée, peut élever les températures à une moyenne de 31°C (S. T. Fall et al., 2000).

Au Sénégal, on retrouve en alternance deux saisons. La saison des pluies durant 4 mois (de juin à septembre), et la saison sèche le reste de l'année (de octobre à mai) (DGPRES, 2014) (figure 2). L'océan Atlantique, bordant la zone des Niayes, apporte un grand taux d'humidité relative, pouvant atteindre 90% dans les parties plus littorales (DGPRES, 2014) durant le mois d'avril (S. T. Fall et al., 2000).

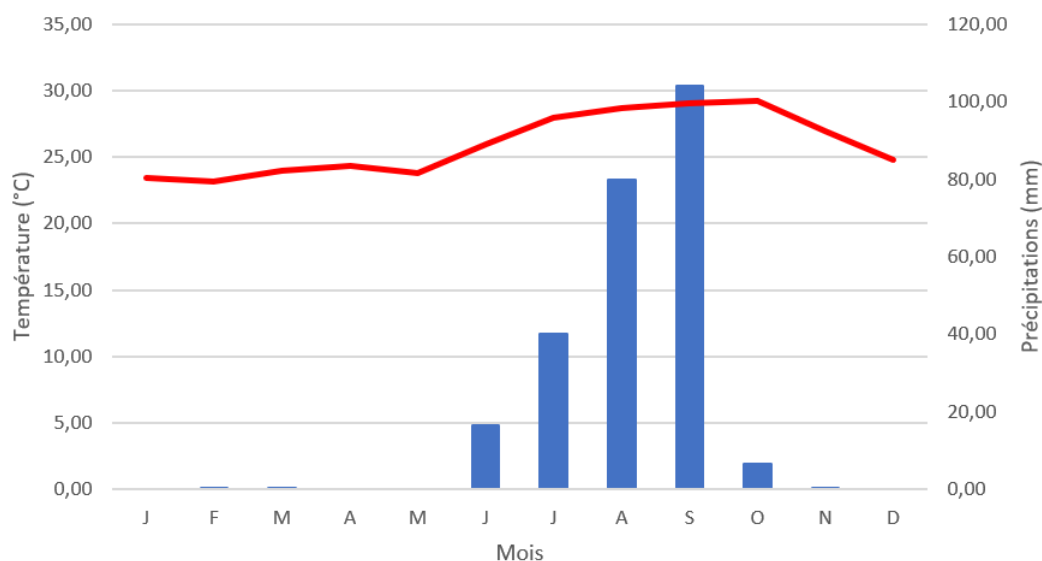


FIGURE 2 – Moyennes des températures et précipitations à Saint-Louis des 5 dernières années entre avril 2014 et mars 2019 (à partir de (S.L, p. d.)) avec en bleu : les précipitations ; en rouge : les températures.

Les précipitations sont inégalement réparties sur le territoire sénégalais. Les isohyètes atteignent 300mm au nord du côté de Saint-Louis et à 500mm au sud de la zone des Niayes, allant jusqu'à 1200mm à l'extrême sud du pays (Malou, 2004). En moyenne, on compte 30 à 35 jours de pluie par an, selon les données enregistrées à la station Dakar-Yoff (Sall, 2010). La pluviométrie interannuelle est irrégulière, avec une réduction des volumes de précipitations de 5-6 mois de pluie à 3-4 mois (M. D. Diallo et al., 2015) au cours du demi-siècle dernier (DGPRES, 2014).

Lors de la saison des pluies, l'apport d'eau massif fait augmenter l'altitude du niveau de la nappe phréatique d'une moyenne de 0,5 à 1m, et retrouve sa valeur initiale vers la fin du mois de juin (SCET, 1968).

L'évaporation potentielle minimale est de 4,5mm/jour durant la saison froide et l'évaporation potentielle maximale, ayant lieu durant la saison chaude, peut aller jusqu'à 6mm/jour .

Dans cette région du monde, et plus particulièrement dans cette région du Sénégal, suite au contexte climatique, la couverture végétale y est naturellement faible. Les espèces sont principalement des espèces herbacées, arbusives ou buissonnantes, servant ainsi à la stabilisation des dunes

(Sall, 2010). La grande majorité des espèces sont d'origine soudanienne (27%) ou guinéenne (12%) que l'on retrouve dans les dunes ogoliennes. On peut également constater le développement d'espèces sahéliennes (herbacées et arbustives) (DGPRES, 2014). Les espèces halophiles, elles, se développent dans les dunes blanches sur un sol hydromorphe à coquilles ayant un horizon superficiel argileux à tourbeux (DGPRES, 2014). De plus, de nouvelles espèces ont été introduites dans la zone, dans les vergers, dans les forêts, mais aussi distribuées plus globalement pour l'aménagement du territoire (DGPRES, 2014).

Entre les années 1948 (DGPRES, 2014) et 1990, une barrière forestière de Filao (*Casuarina equisetifolia*) (Sall, 2010) a été progressivement implantée sur une largeur 300 à 400 mètres entre Dakar et Saint-Louis, tout le long de la Grande Côte Nord du Sénégal sur une superficie de 45 100ha (DGPRES, 2014). Ce projet a été mis en place par le Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (MEDD) afin de faire face au problème d'ensablement des cuvettes maraichères (DGPRES, 2014). Cette ceinture végétale forme une barrière contre le vent et permet la fixation des dunes côtières situées dans la zone des Niayes (DGPRES, 2014). Ce barrage éolien assure ainsi la protection des cultures et des infrastructures humaines localisées près du littoral (PADEN, 2014).

2.3 Contexte pédologique et géologique

La pédologie des sols de la région des Niayes est caractéristique des climats arides. Les différents types de sols présents dans cette zone sont cités ci-dessous :

- Les **sols minéraux bruts d'apport éolien** se situent dans les dunes vives, caractérisés par l'absence d'horizons humifères (DGPRES, 2014) et une totale absence d'évolution du sol (Ndiaye et al., 2012).
- Les **sols ferrugineux tropicaux peu lessivés**, aussi appelés sols "diors" sont des lixisols (M. D. Diallo et al., 2015) formés de sables siliceux de fine granulométrie de couleur orange (Madioune, 2012). Ils caractérisent une grande partie de la zone des Niayes, dans les dunes rouges, occupant près de 70% de la zone des Niayes (Ndiaye et al., 2012) se retrouvant également dans les dépressions dunaires (Khouma et al., 2004). Ils sont sensibles à l'érosion éolienne et au ruissellement, et sont dépourvus de matière organique (DGPRES, 2014). La plupart des activités économiques se développent sur ce type de sol, comme le pastoralisme et les cultures vivrières (DGPRES, 2014).
- Les **sols hydromorphes** argileux se rencontrent dans les dépressions dunaires (Sall, 2010) suite à des formations alluviales (Madioune, 2012). Ils sont très riches en matière organique et se caractérisent par des sols noirs, permettant le développement favorable de cultures maraichères (Ndiaye et al., 2012).
- Les **vertisols sur marnes** se retrouvent dans les dépressions des argiles gonflantes dans la zone de Sébikotane sur le plateau de Bargny, sur l'axe Somone et près du lac Tanma (Ndiaye et al., 2012).

- Les **sols minéraux bruts non climatiques, cuirasses ferralitiques sur marno-calcaire**.
- Les **sols halomorphes** sont caractérisés par une salinité et un pH élevé (Ndiaye et al., 2012) suite à leur formation dans les lagunes côtières au milieu des dunes, d'anciens lacs ou dépressions salées, principalement localisées dans le sud de la région de Thiès (DGPRE, 2014 ; Madioune, 2012).
- Les **sols isohumiques sur sables colluviaux, les sols isohumiques ferrugineux et les sols isohumiques évolués** se situent tous dans la partie nord-ouest de Louga et sud-ouest de Saint-Louis. (Ndiaye et al., 2012).

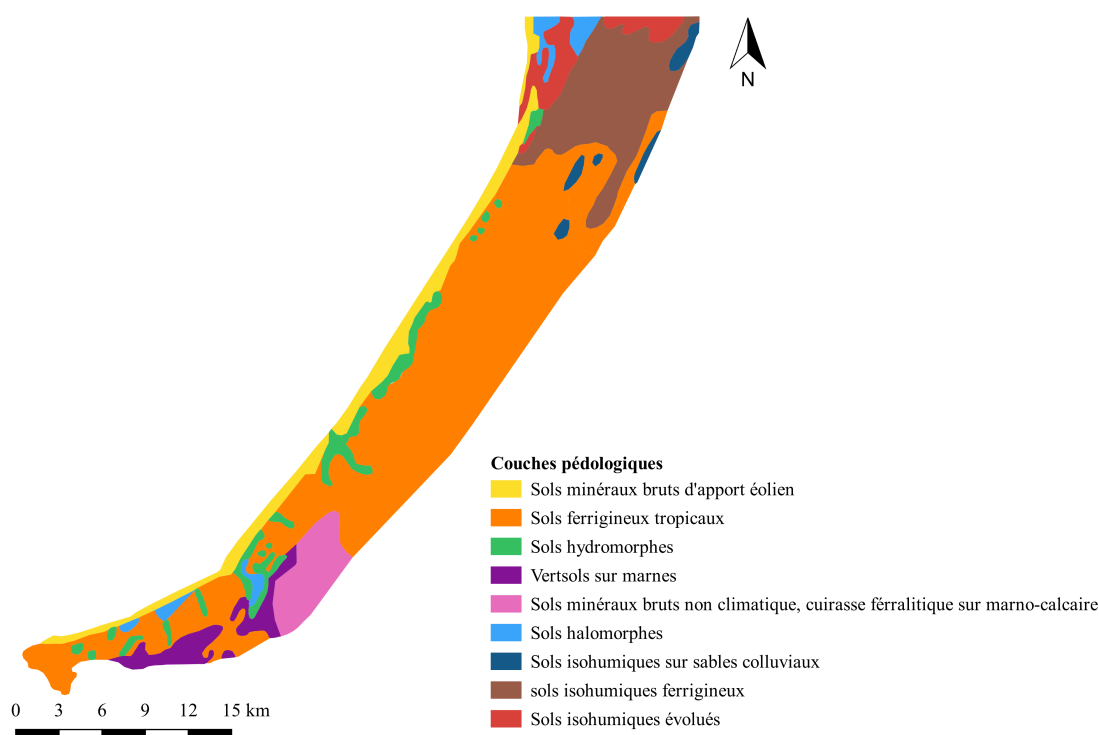


FIGURE 3 – Contexte pédologique de la zone des Niayes (modifié d'après Sall, 2010).

La carte géologique du Sénégal a été réalisée pour la première fois en 1962 par le BRGM (Roger et al., 2009). Cette carte a été remise à jour en 2009 à l'échelle 1/200.000 et 1/500.000 pour la zone des Niayes (Roger et al., 2009).

La géologie du Sénégal se constitue de deux unités géologiques différentes, une partie sédimentaire qui constitue plus de 80% de la surface du pays, faisant partie du bassin sénégalo-mauritanien et d'une seconde partie, le socle précambrien au sud-est du pays, étant composé de formations plissées et métamorphisées de la chaîne montagneuse des Mauritanides (Madioune, 2012). La zone des Niayes étant située à l'ouest du pays, est essentiellement composée d'unités sédimentaires (Roger et al., 2009).

Au début, le substrat sédimentaire du Sénégal s'est formé lors du Trias-Lias, surplombant un socle cristallin plus ancien datant du Protérozoïque au Paléozoïque. C'est au commencement du Jurassique que s'est formé le bassin sénégal-mauritanien suite à la séparation de l'Afrique et l'Amérique du Nord (Madioune, 2012). De nombreux épisodes de transgressions et régressions se sont succédés, immergant épisodiquement les terres. Ces successions de changements de niveaux marins du Lias moyen marquent le début de la période post-rift. C'est à cette période que l'on observe les premiers dépôts carbonatés marins. Durant le Crétacé, une subsidence active s'est mise en place, creusant un bassin sédimentaire pour pouvant accueillir des dépôts calcaires, souvent oolithiques et parfois dolomitiques (Bellion, 1987, Roger et al., 2009). Au Maastrichtien, la subsidence s'atténue, et fait place à d'importants épisodes transgressifs, accompagnés par une activité tectonique active conduisant au soulèvement de horsts dans les régions de Dakar, Diass et Mbour (Roger et al., 2009). Ensuite, les activités volcaniques de la région de Thiès ont commencées lors de l'Eocène Supérieur vers 35,5 \pm 1,5Ma (Crevola et al., 1994). Entre l'Eocène et le Miocène, le horst de Ndiass se fracture (Madioune, 2012). Ce dernier plonge vers le nord et se soulève vers le sud suite à des mouvements tectoniques est-ouest (Madioune, 2012). Des coulées magmatiques en découleront, affectant les régions du Cap-Vert et de Thiès (Madioune, 2012). Certaines hypothèses soutiennent que celles-ci se seraient produites suite à l'apparition d'un point chaud (Roger et al., 2009). Les formations superficielles sont datées du Quaternaire. Au Sénégal, sur les bords de l'Atlantique, on retrouve des faciès continentaux intercalés par des dépôts margino-littoraux formant le "Continental Terminal" (Madioune, 2012).

La classification des différentes entités géologiques de la zone des Niayes, définies par (Sall, 2010) basée à partir de CSE, 2006, M. Fall, 1986 et Dryade, 1990, se fait selon les différentes périodes géologiques. Une représentation théorique de la géologie de la zone d'étude est représentée figure 4.

Formations du Maastrichtien :

La formation de Paki et la formation du Cap de Naze forment le groupe de Ndiass. Ces deux formations géologiques, étant les plus vieilles, constituent l'unité sédimentaire du substrat (Roger et al., 2009). Il s'agit d'une alternance de dépôts argileux et gréseux sur une épaisseur variant de 200 à 300 mètres (Roger et al., 2009). On les retrouve dans la région de Thiès suite à la remontée des couches plus anciennes par le horst de Ndiass lors d'un évènement compressif (Sall, 2010).

Formations du Paléocène :

A la base du Paléocène, on retrouve des formations marneuses et marno-calcaires d'une épaisseur de 50 m (Audibert, 1970) témoignant le dépôt de sédiments en bassin océanique (Madioune, 2012) reposant en discordance sur les formations du Maastrichtien (Gning, 2015). Des calcaires argileux surmontent ces derniers pour évoluer jusqu'à des calcaires purs au sommet de la séquence sédimentaire (Sall, 2010) (Roger et al., 2009). Ces formations affleurent également aux horsts de Ndiass (Sall, 2010).

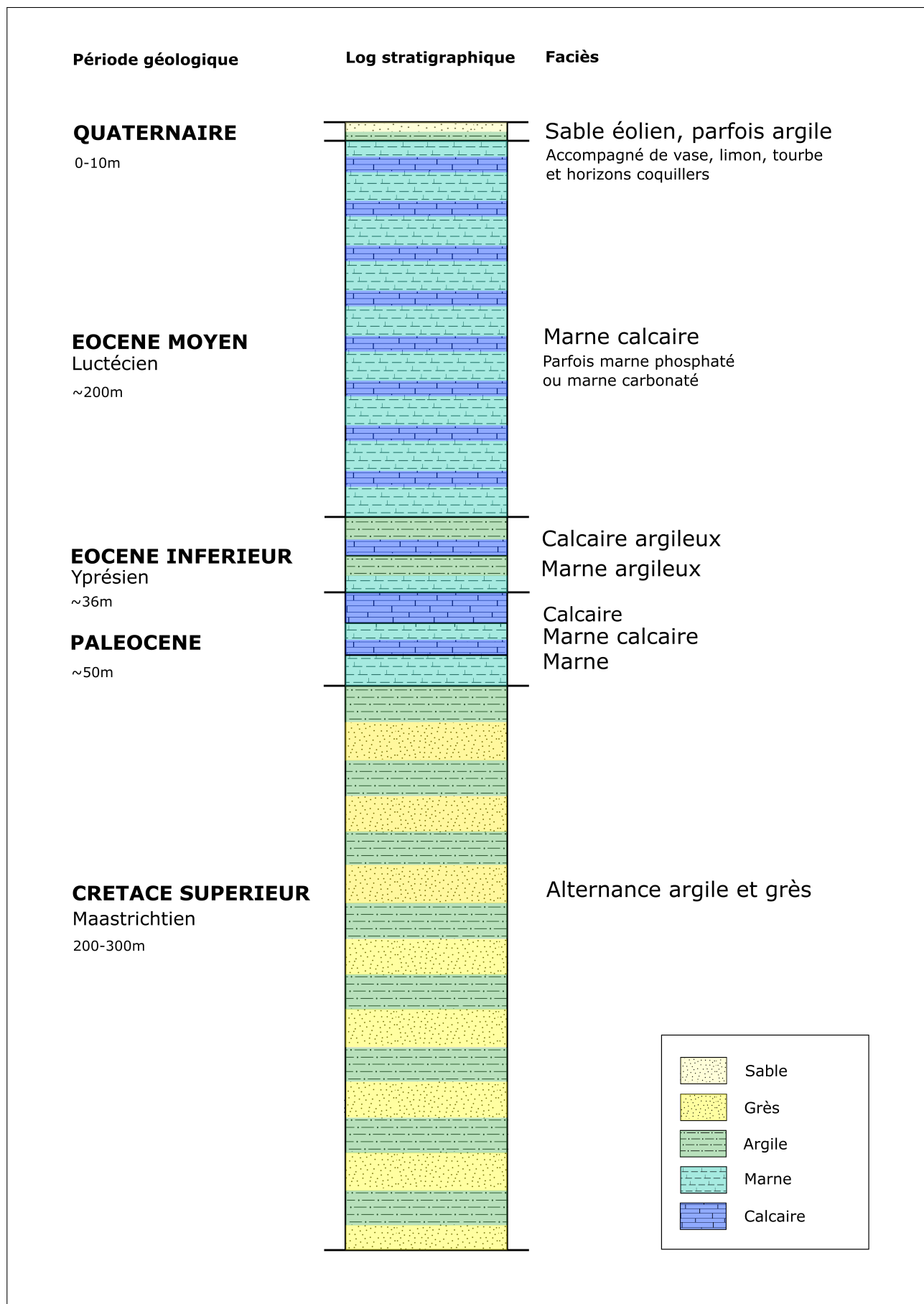


FIGURE 4 – Log stratigraphique théorique de la zone des Niayes.

Formations de l'Eocène inférieur (Yprésien) :

Suite à une transgression marine homogénéisant les sédiments (Roger et al., 2009), on retrouve des marnes argileuses surmontées par des calcaires argileux (Sall, 2010) sur une épaisseur maximale de 36m (Gning, 2015). Celles-ci affleurent sur la rive Est du lac Tarma (Sall, 2010).

Formations de l'Eocène moyen (Lutécien) :

Les formations de Matam du Lutécien sont composées de marnes calcaires comme au début de cette période, mais aussi de marnes phosphatées et de marnes carbonatées (Gning, 2015) d'une épaisseur de 200m du côté de Saint-Louis (Audibert, 1970). Ces dernières se retrouvent au niveau du plateau de la région de Thiès et affleurent sur la rive du lac de Tarma et dans la presque-île du Cap-Vert (Sall, 2010).

Formations du Quaternaire :

Les formations du Quaternaire forment les couches superficielles et affleurent dans l'ensemble de la zone des Niayes. Ce sont des formations de sable éolien, parfois d'argiles d'une épaisseur allant de 1 à 10 mètres. On y retrouve également de la vase, du limon, de la tourbe et des horizons coquilliers (Sall, 2010). Ces dépôts sont liés à des variations du niveau eustatique (Madioune, 2012).

2.4 Contexte géomorphologique et structural

La zone des Niayes est composée d'une succession de dunes de différentes couleurs et de compositions variées. Nous en retrouvons 3 distinctes (DGPPE, 2014) (figure 5) :

Les dunes littorales, appelées aussi dunes blanches ou dunes vives sont les dunes s'étant formées le plus récemment lors du Quaternaire il y a environ 2000ans (DGPPE, 2014). Celles-ci se retrouvent tout le long du littoral de la Grande Côte sur une largeur variant de quelques mètres à une centaine de mètres, avec un maxima de 1km (Sall, 2010). Le nom vient du sable coquiller caractéristique qui lui confère une couleur naturellement blanche (DGPPE, 2014). Suite à la fine granulométrie des grains, la mobilité de ces cordons dunaires est très grande, pouvant aller jusqu'à un déplacement progressif de 5 à 7m par an (DGPPE, 2014).

Les dunes jaunes ou dunes semi-fixées se retrouvent juste derrière les dunes littorales et sont légèrement plus anciennes que ces premières. Leur largeur varie entre 250 et 2000m (DGPPE, 2014). Elles présentent des profils assez abrupts suite à l'érosion éolienne et ont une orientation générale vers le NNE (Sall, 2010). Des lacs se retrouvent intercalés dans ce cordon sableux, principalement dans la partie sud, près de Thiès, formants de sols hydromorphes fertiles et très riches en matière organique (DGPPE, 2014).

Les dunes rouges, dunes intérieures ou « diors » dans la terminologie locale (Ndiaye et al., 2012) se situent derrière les dunes jaunes et sont les plus anciennement formées, sur une largeur inférieure à 3km (DGPPE, 2014). Elles datent de l'Ogolien (15.000-20.000BP) et sont également appelées dunes ogoliennes. Le sol est composé de sable ferrugineux lui conférant sa couleur rouge. Il y a très peu de matière organique, une faible concentration de nutriments et possède peu de structure (DGPPE, 2014). En saison sèche, la partie superficielle est très sensible à l'érosion éolienne (DGPPE, 2014).

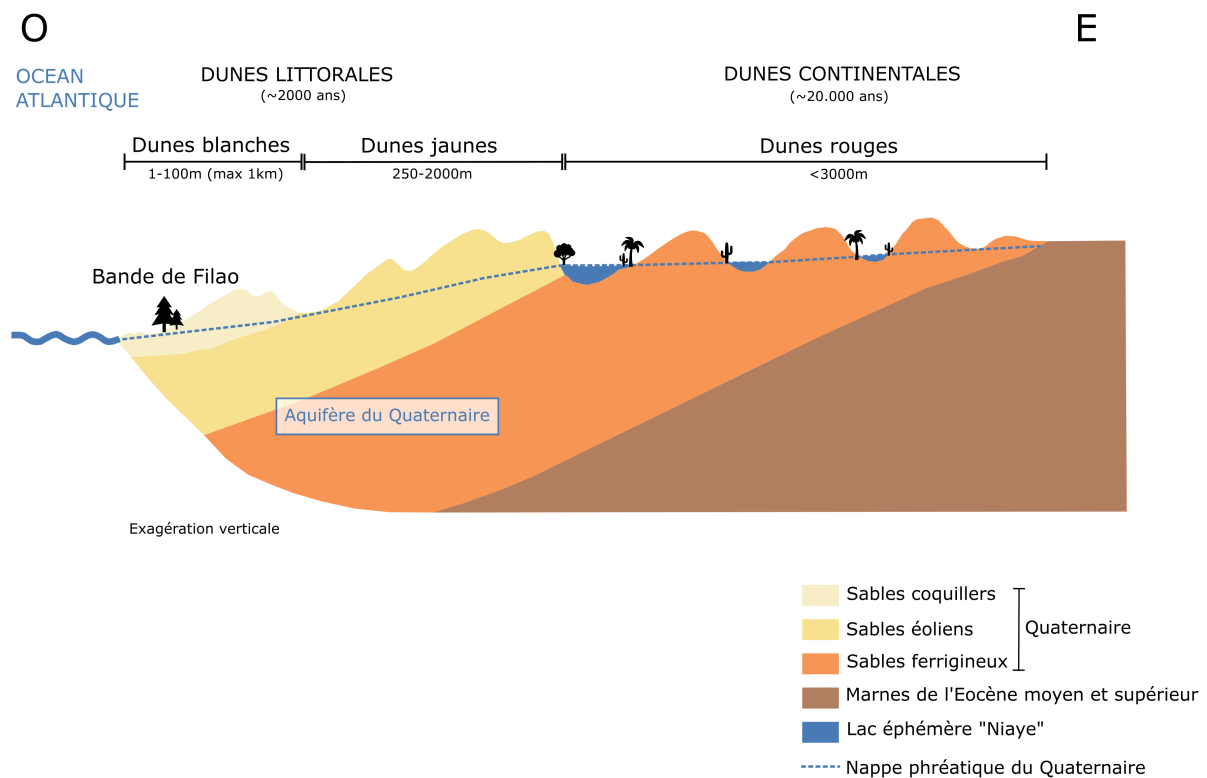


FIGURE 5 – Contexte géomorphologique et hydrogéologique de la zone des Niayes (inspiré de (Pezeril et al., 1986) tiré de (Sall, 2010)).

Entre ces différents systèmes dunaires se trouvent des dépressions nommées Niayes, donnant le nom à cette région. Ces cuvettes démontrent le sillage d'anciens cours d'eau anciennement connectés à l'océan (Sall, 2010). Ces axes alluviaux ont été interrompus suite à la formation des cordons dunaires (M. Fall, 1986). Il y a 389 cuvettes comptabilisées entre Dakar et Saint-Louis, de formes et tailles variables (CSE, 2006). La superficie de ces anciens sillons est de 26.000ha. Dans la région de la presque-île du Cap Vert, les lacs sont plus ou moins salés et forment un réseau large bien structuré. Au centre se trouvent de grandes dépressions contrairement à la région du Nord où les dépressions forment des petites cuvettes et mares de formes diverses (Sall, 2010).

Le bassin sédimentaire du littoral Sénégalais est composé de couches sub-horizontales plongeant vers l'ouest (Madioune, 2012). Lors de l'ouverture de l'océan Atlantique, d'importantes contraintes tectoniques ont provoqué de nombreuses failles listriques, typiques d'une marge passive. Ces failles ont été détectées grâce à des investigations géophysiques ou des sondages pétroliers. On retrouve donc de nombreux grabens et horst parallèles au littoral dans les alentours de la presque-île du Cap-Vert. Cette ouverture a impacté la structure du sol principalement du Crétacé jusqu'au Cénozoïque (Roger et al., 2009).

2.5 Contexte hydrogéologique

L'aquifère du Maastrichtien recèle une nappe profonde captive (Madioune, 2012), ayant un apport d'eau salée venant du nord, probablement lié à des mouvements transgressifs et regressifs de la mer (Seck, 2015), ce qui la rend impropre à la consommation. L'apport d'eau douce de cette nappe se fait via le horst de Ndiass et par d'anciennes vallées (Sall, 2010). Le Maastrichtien présente des variations de faciès et d'épaisseurs du nord au sud. Au nord, il s'agit de sables grossiers d'une épaisseur moyenne de 250m évoluant progressivement vers des sables plus fins vers le sud avec des épaisseurs pouvant atteindre 500m d'épaisseur (Baye, 1976). Les réserves de cet aquifère sont estimées à 300 et 400 milliards de m³ avec un potentiel renouvelable de 200 millions de m³ par an pour l'ensemble du pays (DGPRES & PEPAM, 2014).

L'aquifère du Paléocène renferme une nappe semi-profonde étant majoritairement captive mais libre localement (Sall, 2010) constitué de calcaires karstifiés. Les réserves sont estimées à 10 milliards de m³ (DGPRES & PEPAM, 2014). Les eaux sont stockées dans les failles calcaires du Paléocène orientées nord-sud de l'anticlinal de Ndiass dans la partie sud-ouest du Sénégal (Baye, 1976; DGPRES, 2014).

Le système aquifère semi-profond de l'Eocène est constitué de calcaires karstifiés et de marnes calcaires (Sall, 2010). L'ensemble des deux aquifères semi-profonds ont des épaisseurs variables de 5 à 120m (DGPRES, 2014) avec des réserves estimées à 10 milliards de m³.

L'aquifère du Continental Terminal et l'aquifère des sables Quaternaires du littoral retiennent une nappe libre superficielle. A dominance sableuse, sablo-argileuse et gréseuse, l'aquifère du Quaternaire varie de quelques mètres à une dizaine de mètres, tandis que celui du Continental peut aller jusqu'à 150m (Baye, 1976; DGPRES, 2014) faisant d'eux des aquifères intéressants. Ils s'étendent sur une superficie de 5000km² (Sall, 2010) avec des réserves globales de 50 à 75 milliards de m³ avec un renouvellement de 5 milliards de m³ par an (ATADEN, 2006 dans (DGPRES, 2014). Les eaux ont tendance à s'écouler vers le nord-ouest en direction de l'océan et vers le nord-est vers les calcaires de l'Eocène moyen (Sall, 2010).

Des biseaux salés pénètrent à l'intérieur des terres suite à un rabattement progressif en profondeur de la nappe (Sall, 2010). Cette intrusion est plus ou moins prononcée en fonction des régions (Sall, 2010). Au Sud, les eaux salines s'enfoncent jusqu'à 100m sur le continent, jusqu'à 200m dans la zone de Mboro, et peut aller jusqu'à 500m dans le Nord dans la zone de l'embouchure du fleuve Sénégal (Sall, 2010).

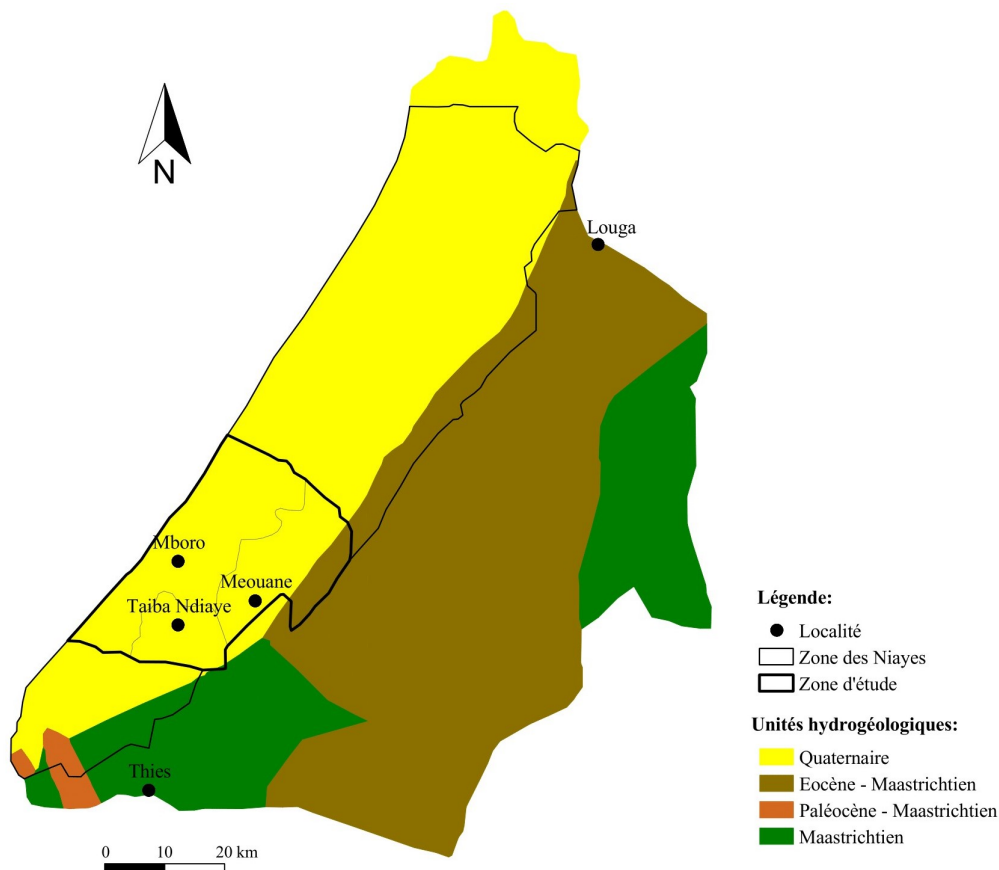


FIGURE 6 – Aquifères de la zone des Niayes (d’après DGPRE, 2014).

Les lacs salés et saumâtres se sont formés entre les dunes du littoral suite à une succession de phénomènes transgressifs et régressifs durant le Quaternaire (Sall, 2010). Actuellement, l’apport d’eau dans ces lacs provient des précipitations locales ou des remontées d’eaux souterraines (Sall, 2010). Les eaux sont généralement douces, mais parfois celles-ci peuvent être d’origine marine (Sall & Vanclooster, 2009).

L’aquifère est très productif et peut être exploité avec un débit de $100\text{m}^3/\text{h}$, ne provoquant une perturbation du niveau piézométrique d’un maximum de 10m. Le volume total d’eau, utilisé à des fins d’eau potable, est estimée à $4166\text{m}^3/\text{h}$ pour l’ensemble de la zone des Niayes (Sall & Vanclooster, 2009). La recharge de la nappe est verticale et naturelle (Sall & Vanclooster, 2009).

Le ruissellement est un des facteurs à prendre en compte pour éviter la diminution de la recharge de la nappe. En effet, lorsque l’eau ruisselle sur des sols, cette eau ne s’infiltré pas dans le sol, ne recharge pas les nappes et tente de rejoindre l’océan. La gestion des eaux étant une problématique constante dans ces régions, il est donc primordial de récupérer un maximum d’eau tombée lors des précipitations.

A Thiès, l'organisation non-gouvernementale ADT GERT agit dans le domaine de la préservation des ressources naturelles et de la restauration des sols, et donc aussi, sur la lutte contre le ruissellement dans les terroirs villageois localisés sur le plateau de Thiès au Sénégal.

Différents ouvrages peuvent être réalisés afin de lutter contre ce ruissellement : les méthodes mécaniques et les méthodes biologiques. Les méthodes mécaniques sont nombreuses et essayent, peut importe le principe et l'agencement, de faire diminuer la vitesse d'écoulement des eaux afin de leur laisser le temps de s'infiltrer dans le sol. Ces différentes techniques sont les suivantes : les cordons pierreux, les tranchées à ciel ouvert, les croissants lunaires ou demi-lunes, les fosses de rétention et/ou infiltration, les diguettes filtrantes, les trous d'infiltration à fond empierrés, les puits de régulation, les seuils en pierres sèches, les zaïs forestiers, le traitement des termitières (Savaria & Sané Ansoumana, 2019).

Les méthodes biologiques permettent la fixation et la perméabilité des sols, favorisant ainsi l'infiltration des eaux de pluies tout en régularisant l'évapotranspiration. Il s'agit donc principalement de régénération végétale par du reboisement avec des plantations de renforcement des ouvrages mécaniques, des bandes boisées et/ou herbacées, des haies vives, des fascines végétales, ... (Savaria & Sané Ansoumana, 2019).

Les eaux de la nappe quaternaire des Niayes sembleraient suivre le niveau topographique de la région en s'écoulant principalement du Sud vers le Nord, en direction de l'océan (CTB & Université de Liège, 2015 ; Madioune, 2012).

2.6 Contexte industriel et agricole

Dans les communes de Taïba Ndiaye, Darou Khoudoss et Méouane, plusieurs industries chimiques se sont implantées ayant des impacts directs ou indirects sur l'hydrochimie des eaux souterraines. Les deux principaux complexes industriels sont les suivants :

L'Industrie Chimique du Sénégal (ICS) est localisée en plein coeur de la zone d'étude dans la commune de Darou Khoudoss. Elle exploite les sables du Quaternaire afin d'y extraire le phosphate présent naturellement dans la roche. Localisée entre les trois communes de Taïba Ndiaye, Darou Khoudoss et Méouane, l'impact est important au point de vue de la gestion des eaux. Lors d'une rencontre personnelle durant le séjour avec un travailleur en production chez ICS, celui-ci m'a expliqué le fonctionnement de la mine ainsi que et la gestion des eaux. Ils traitent le sable à l'eau, formant alors une eau phosphatée. Au travers de divers processus, ils obtiennent une eau sulfurée, et des rejets solides de gypse. C'est cette eau acidifiée qui est commercialisée. Dans cette zone occupée par les ICS, l'horticulture et le maraîchage sont pratiqués dans leurs cuvettes d'exploitation et irriguent les champs avec leurs eaux (PADEN, 2014). Suite à l'implantation de cette mine, les surfaces cultivables ont considérablement diminué, des villages entiers ainsi que leurs terres cultivables ont été délocalisés, menant à des problèmes de santé sur les populations liés au soufre (problèmes respiratoires, impacts sur les femmes enceintes) mais également induit des désastres au point de vue de certaines cultures, tels que les manguiers qui ont vu leur rendement nettement diminuer (PADEN, 2014).

La société de droit Sénégalais, *Mineral Deposits Ltd* en association avec Grande Côte Opération (MDL/GCO), la troisième plus grande exploitation minière de zircon au monde avec sa superficie de 46.000 ha est localisée le long de la Grande Côte à proximité des villages de Mboro, Diogo, Fass Boye et Lompoul (DGPRES & PEPAM, 2014). Il n'y a que très peu de littérature concernant l'exploitation de ce minerai.

D'autres industries sont implantées sur le site, tel que le plan TAKKAL - Senelec, permettant la relance et le développement du secteur de l'énergie, Sarréole, Sephos Sénégal S.A.

Du point de vue de l'agriculture, la région est principalement dominée par l'arboriculture (mangues, manioc), mais on retrouve également du maraîchage et de l'horticulture (PADEN, 2014). Il s'agit d'un endroit clé pour le Sénégal en terme de production. Cependant, les habitants de cette région connaissent des problèmes comme le manque d'eau, des problèmes de qualité, ainsi que la difficulté de vendre les productions dû à des problèmes de conservation des produits récoltés (PADEN, 2014).

L'élevage n'est pas une pratique très développée dans la zone des Niayes. Il est exclusivement inclusif et ne dispose pas de pâturage. Le bétail ne pourrait pas se nourrir d'herbe recouvrant la région à cause de maladies pouvant être présentes.

3 Matériels et méthodes

3.1 Topographie

Le GPS différentiel (en anglais : *Differential Global Positioning System* : DGPS) permet d'acquérir des coordonnées plus précises que le GPS. Celui-ci permet d'éliminer les erreurs survenant lors des mesures GPS tels que les interférences atmosphériques, les erreurs d'horloges et les fautes de calculs (Ayrat & Sauvagnargues-Lesage, 2009), pouvant ainsi affecter la précision du positionnement (Lejeune & Hellemans, 2000). Le DGPS est composé d'une station fixe de référence située à un point géodésique de coordonnées (x,y,z) connues et d'une station mobile. La station fixe calcule la différence entre les coordonnées connues et les coordonnées mesurées pour donner une pseudo-distance. Ces données vont être renvoyées aux satellites qui vont à leur tour les envoyer à la station mobile. Celle-ci va alors établir une correction entre la pseudo-distance et les coordonnées mesurées. Un post-traitement des données sera alors effectué afin d'avoir les coordonnées finales. La précision avec un DGPS peut varier entre 1 et 10 mètres en fonction du type de récepteur (Lejeune & Hellemans, 2000) mais peut également aller jusqu'au centimètre près lorsque le réseau de station GPS est plus dense (Ayrat & Sauvagnargues-Lesage, 2009).

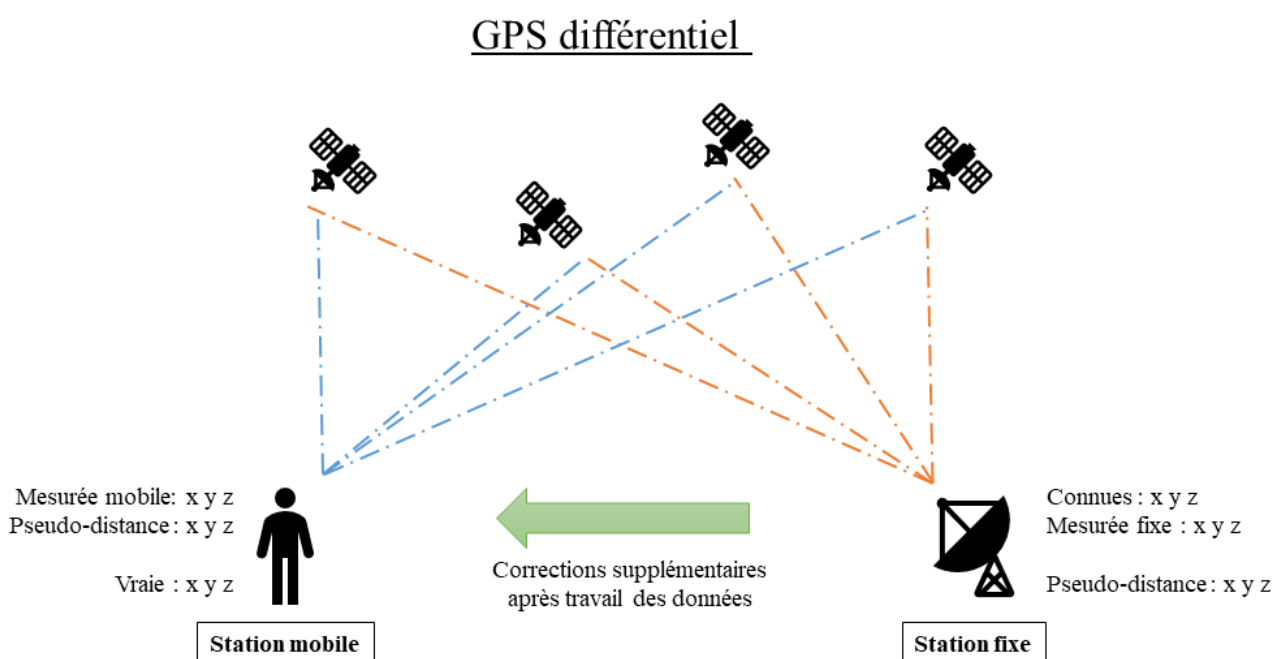


FIGURE 7 – Schéma théorique du fonctionnement d'un GPS différentiel (inspiré de *National Oceanic and Atmospheric Administration*).

Le matériel utilisé lors des mesures prises en mars 2019 est illustré sur la figure 8. Il s'agit du GPS différentiel chc i80. Le point géodésique de référence est le RRS2 030 localisé sur la plaine de sport de l'école secondaire de Darou Khoudoss. Le RRS2 étant le réseau de référence du Sénégal de 2ème ordre créé en 2008 et s'appuyant sur le 1er ordre (avec 137 points) (ANAT - Agence Nationale Pour l'Aménagement Du Territoire p. d.).



FIGURE 8 – Nivellement au GPS différentiel lors de la campagne de terrain de mars 2019 dans les communes de Darou Khoudoss, Taïba Ndiaye et Méouane ; avec en a) la station GPS fixe de référence localisée précisément sur le point géodésique RRS2 030 (agrandissement en (b)) ; et en c) la station GPS mobile localisée sur un point de repère (agrandissement en (d)).

3.2 Paramètres physico-chimiques des eaux souterraines

Description de la procédure d'échantillonnage et de la prise des paramètres physico-chimiques :

- Etalonnage des 4 sondes paramétriques avant l'utilisation ;
- Mesure des paramètres physico-chimiques avec une sonde multi-paramétrique Hach-HQ40d (figure 9) : la conductivité électrique ($\mu\text{S}/\text{cm}$), les réactions d'oxydo-réduction (Eh) (mV), le pH, le taux d'oxygène dissous (mg/L) ainsi que la température de l'eau ($^{\circ}\text{C}$). Ces mesures ne sont pas conservatives, il est nécessaire de faire ces mesures directement après le prélèvement afin d'avoir un résultat fiable. Les valeurs peuvent varier durant leur conservation et transport.
- Prise de l'échantillon dans des bouteilles d'eau commercialisées d'un volume de 33 cl.
- Étiquetage et conservation de l'échantillon à l'abri de la lumière et à température ambiante (30°C).



FIGURE 9 – Mesure des paramètres physico-chimiques avec la sonde mutli-paramétrique Hach-HQ40d; avec en a) deux sondes (parmis les 4) permettant de mesurer les paramètres physico-chimiques disposée dans l'échantillon d'eau du puits à analyser; en b) l'ensemble de l'appareil, les sondes et le dispositif de prise de mesures et en c) le dispositif de mesure, avec les valeurs des paramètres physico-chimiques s'affichant sur le cadran. Photos prises lors de la campagne de mars 2019 sur la zone d'étude.

3.3 Notions théoriques

3.3.1 Diagrammes

Les diagrammes de Piper, Stabler, Stiff et Schoeller-Berkaloff permettent de faire une première caractérisation de la qualité des eaux, de déterminer leurs origines et leurs influences ainsi que de mettre en évidence des procédés hydrochimiques majeurs (Haselbeck et al., 2019).

Le **diagramme de Piper** (Piper, 1944) est un outil très utile permettant une bonne visualisation et quantification des différents types d'eau, l'analyse de l'évolution des processus hydrochimiques, la dissolution des carbonates et les processus d'oxydo-réduction (Haselbeck et al., 2019; Piper, 1944). Le diagramme de Piper est un diagramme en 8 dimensions représentant les ions majeurs, permettant de déterminer les faciès hydrochimiques des différents échantillons en fonction de leur positionnement. Le diagramme ternaire de gauche est divisé en trois régions cationiques de type Mg^{2+} , $[Na^+ + K^+]$ et Ca^{2+} et celui de droite est divisé en trois régions anioniques de type $[CO_3 + HCO_3]$, $[Cl + NO_3]$ et SO_4^{2-} (Piper, 1944).

Le **diagramme de Schoeller-Berkaloff** montre les concentrations en anions et cations en meq/L sur une échelle semi-logarithmique. Il permet une mise en évidence visuelle de la parenté des différentes eaux (Amin, 2001; Louvrier, 1971). Celui-ci permet une représentation claire et facile pour autant que le nombre d'échantillons ne soit pas trop élevé, ce qui provoquerai des superpositions et une lecture compliquée du diagramme.

Le **diagramme de Stiff** permet de représenter la minéralisation de l'eau sous forme de polygones dont la forme est caractéristique d'un faciès chimique. Il permet de classer les échantillons en fonction de leur forme (faciès chimique) et de leur taille (minéralisation).

Le **diagramme de Stabler** est utilisé pour comparer les proportions entre les différents éléments en solution et non par rapport à leur quantité.

La qualité de l'eau utilisée pour l'irrigation, la consommation domestique ainsi que pour l'eau potable va dépendre, entre autre, de la dureté (Karanth, 1987). Les diagrammes de Riverside et Wilcox permettent de représenter cette qualité en mettant en rapport les processus alcalinisants en fonction de la conductivité électrique à 25°C. La limite admissible de dureté pour l'eau potable est de 500mg/L, et la limite souhaitable définie par l'OMS est de 100mg/L (Ebong et al., 2017). Les eaux utilisées pour l'irrigation doivent correspondre à certains critères pour la conservation durable des sols. Les limites sont représentées dans le diagramme de Wilcox (Raats & Clothier, 2015 ; Wilcox, 1955).

Le **diagramme de Riverside** met en relation le Coefficient d'Absorption du Sodium (SAR : *Sodium Absorption Ratio*) avec la conductivité électrique à 25°C. Le SAR indique dans quelle mesure l'eau peut avoir une réaction d'échange d'ion (Bradaï & Douaoui, 2013 ; Ebong et al., 2017). Une quantité trop élevée en ions dissous peut provoquer une modification des propriétés du sol diminuant la productivité des cultures et de développement des semences, une diminution de la perméabilité des sols (Ebong et al., 2017) et à long terme peut causer des problèmes cardiaques sur les populations (Schoeller, 1960). Il se calcule via la formule suivante (Nagaraju et al., 2014) :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{(Ca^{2+} + Mg^{2+})/2}} \quad (1)$$

Le **diagramme de Wilcox** exprime le %Na (équation 2) en fonction de la conductivité électrique à 25°C, permettant de classer les eaux en fonction leur impact sur les sols (Al-Omran et al., 2018).

$$\%Na = 100 \cdot \left(\frac{Na^+ + K^+}{Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+} \right) \quad (2)$$

3.3.2 Indices de saturation

Lors d'une réaction chimique entre l'eau et le minéral, un équilibre chimique se fait. L'écart à l'équilibre est défini par l'indice de saturation (IS). Il permet de montrer la sensibilité des minéraux carbonatés (aragonite, calcite, dolomite) et des minéraux évaporitiques (anhydrite, gypse) à la précipitation (Appelo, 2005). Il peut être défini comme suit :

$$IS = \log\left(\frac{PAI}{K_S}\right) \quad (3)$$

où IS est l'indice de saturation, PAI est le produit d'activité ionique et K_S est la constante du produit de solubilité (Nordstrom & Campbell, 2014). Lorsque $IS > 0$, la solution est sur-saturée et le minéral va tendre à précipiter alors que lorsque $IS < 0$, la solution est en sous-saturation et le minéral va tendre à se dissoudre, s'il est présent en solution (Appelo, 2005). Selon Nordstrom & Campbell, 2014, lorsque IS est égal à 0 et que l'équilibre thermodynamique est égal au produit d'activité ionique, l'équilibre se fait entre la solution et le minéral, tandis que selon Droubi et al., 1976, celui-ci est atteint lorsque les valeurs de l'indice de saturation se situent entre -0,5 et +0,5.

Les indices de saturation sont directement calculés grâce au module PHREEQC (Parkhurst & Appelo, 1999) implanté dans le programme « Diagramme » (Simler, 2006). Le module PHREEQC est utilisé pour la simulation d'une variété de réactions et processus d'eaux naturelles ou d'expériences de laboratoire (Appelo, 2005).

3.3.3 Échanges ioniques

En zone côtière, lorsqu'une eau salée rencontre une eau douce, des échanges ioniques ont lieu (figure 10). La composition de l'eau de mer est dominée par des ions Na^+ et Cl^- . Les sédiments en contact avec l'eau de mer auront principalement du Na^+ sur l'échangeur (Appelo, 2005). Dans les eaux douces, les ions Ca^{2+} et HCO_3^- sont les ions dominants suite à la dissolution de la calcite, où le Ca^{2+} est l'ion échangeur (Appelo, 2005).

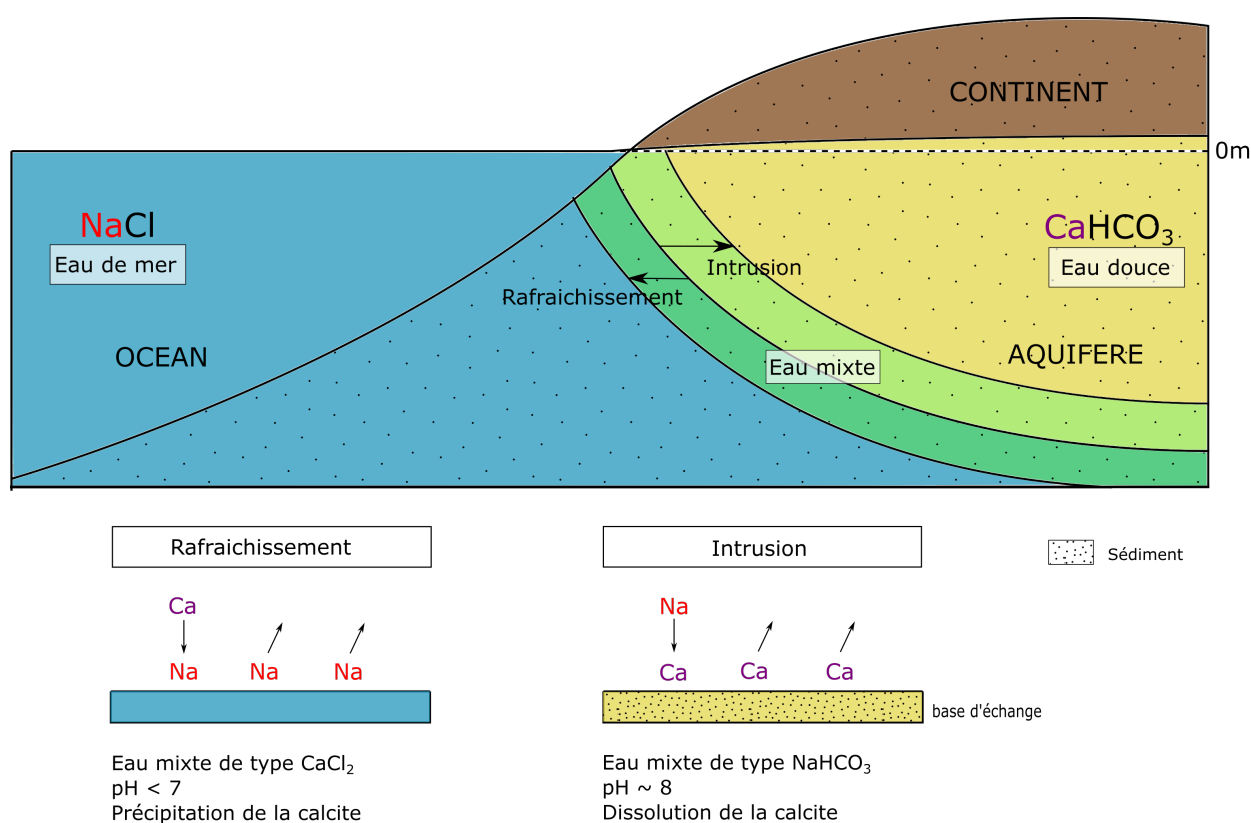
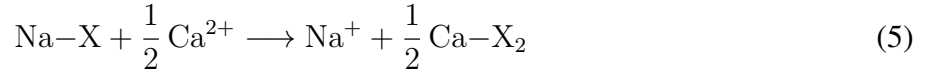
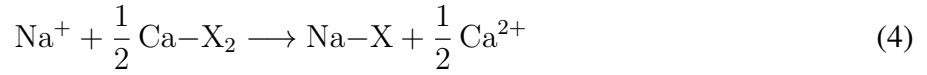


FIGURE 10 – Échanges ioniques en cas d'intrusion saline et de rafraichissement.

Lors d'une intrusion d'eau saline, l'eau de mer de composition NaCl va se mélanger avec l'eau douce des nappes de composition $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Lors de ce mélange, les cations Na^+ de l'eau de mer vont être adsorbés par le sédiment libérant le Ca^{2+} en solution (Jones et al., 1997). Ce phénomène va créer du $\text{Na}(\text{HCO}_3)$ et aura une tendance à faire augmenter le pH de la solution suite à la dissolution de la calcite (CaCO_3) (équation 4). Dans le cas d'un rafraichissement, c'est le phénomène inverse qui se produit avec les ions Ca^{2+} qui vont prendre la place des ions Na^+ de l'eau de mer (Appelo, 2005). L'ion Cl^- étant constant dans un environnement marin naturel (Fetter et al., 1993), la composition de l'eau dans la zone mixte passe donc à un type CaCl_2 (Appelo, 2005) (équation 5).



où X indique le sol échangeur, HCO_3 dans le cas de l'intrusion et Cl^- dans le cas du rafraichissement.

3.3.4 Self-Organizing Maps (SOM's)

Les *Self-Organizing Maps* sont des statistiques multivariées basées sur l'utilisation d'algorithmes mathématiques permettant d'interpréter une importante quantité d'échantillons (Haselbeck et al., 2019; Kohonen, 2013, Kohonen et al., 2001). Cette méthode est fortement utilisée en hydrogéologie afin de discerner les liens entre les différentes variables (paramètres physico-chimiques et éléments majeurs) ainsi que pour classer les échantillons ayant les mêmes caractéristiques (López Garcíá & Machón González, 2004; Nguyen et al., 2015; Peeters et al., 2007; Vesanto et al., 1999).

Cette méthode est largement utilisée dans le domaine de l'hydrogéologie, afin de discerner les liens entre les différentes variables (paramètres physico-chimiques et éléments majeurs) ainsi que pour classer les échantillons ayant les mêmes caractéristiques (López Garcíá & Machón González, 2004; Nguyen et al., 2015; Peeters et al., 2007; Vesanto et al., 1999), dans le cas d'eaux de surface (Hall & Minns, 1999), de nappes d'eau plus profondes (Gamble & Babbar-Sebens, 2012; Nguyen et al., 2015) ou encore de précipitations (Astel et al., 2004). Par exemple, Gamble & Babbar-Sebens, 2012 et Nguyen et al., 2015 ont utilisé l'application des SOM's pour la caractérisation de la qualité des eaux dans, respectivement, le *White River Basin*, en Indiana aux USA et le *Red River Delta* au Vietnam. Haselbeck et al., 2019 lui, s'en est servi pour l'analyse de l'origine de la salinité des eaux souterraines d'une ancienne zone d'extraction de sel dans une mine de Potasse au nord de l'Allemagne. Les SOM's sont également appliquées dans les domaines des sciences naturelles, de la linguistique, de l'économie ainsi que dans le domaine industriel (Kohonen, 2013).

Les *Self-Organizing Maps* ou *Kohonen Maps* (Ballabio & Vasighi, 2012) sont des réseaux de neurones artificiels (ANN) en 2 dimensions à typologie hexagonale (Gamble & Babbar-Sebens, 2012; Peeters et al., 2007). Ces algorithmes scientifiques sont inspirés du fonctionnement du système nerveux du cerveau humain, celui-ci ayant la capacité d'apprendre à partir de données et de les généraliser (Peeters et al., 2007). Le but des assemblages est de classer un grand nombre de données en fonction de leur similarités et non de les classer selon des prédictions (Peeters et al., 2007). Le réseau est composé d'une couche d'entrée et une couche de neurones, disposés dans une grille hexagonale en deux dimensions, où chaque vecteur d'entrée est connecté à chaque unité (Peeters et al., 2007).

L'algorithme appliqué au réseau peut être réalisé en 6 étapes (Peeters et al., 2007) :

1. Une matrice $n \times m$ est créée à partir de l'ensemble des données, avec n colonnes correspondant au nombre de variables et m rangées représentant le nombre d'échantillons (Peeters et al., 2007). Ces vecteurs d'entrées sont rangés en fonctions de leur dimension, nommée *distance Euclidienne*, représentant la distance entre le vecteur d'entrée considéré X et les vecteurs de référence (M_i) (Peeters et al., 2007).
2. Chaque neurone reçoit aléatoirement une valeur de "poids initial" ou vecteur de référence où la longueur correspond à celle du vecteur d'entrée (n) (Peeters et al., 2007).
3. La *distance Euclidienne* peut être calculée comme suit :

$$\begin{aligned} X &= (x_1, x_2, \dots, x_n) \in \mathbb{R}^n \\ M &= (m_1, m_2, \dots, m_n) \in \mathbb{R}^n \\ ||X - M|| &= \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_i - m_i)^2} \end{aligned} \quad (6)$$

4. La valeur ayant la meilleure similarité avec le vecteur de référence (M_i) et le vecteur d'entrée (n) est appelé la meilleure valeur d'adaptation (M_c) (Peeters et al., 2007). Plus la valeur de (M_c) est élevée, plus elle aura un poids important par rapport aux autres valeurs (Peeters et al., 2007).

$$||X - M_c|| = \min_i \{ ||X - M_i|| \} \quad (7)$$

5. Le poids de la meilleure valeur et celle de son voisin $N(t)$ sont ajustés afin que le nouveau vecteur de référence soit le plus proche du vecteur d'entrée (Peeters et al., 2007). C'est le taux d'apprentissage, $\alpha(t)$, qui va contrôler la vitesse de changement des vecteurs de référence (Peeters et al., 2007). Les fonctions utilisées pour cette application sont de type Gaussienne.
6. Les étapes 3 à 5 sont répétées jusqu'à un nombre maximum prédéfini d'itérations. Durant ces répétitions, les valeurs de $\alpha(t)$ et $N(t)$ vont progressivement diminuer et converger vers les meilleures valeurs (Peeters et al., 2007).

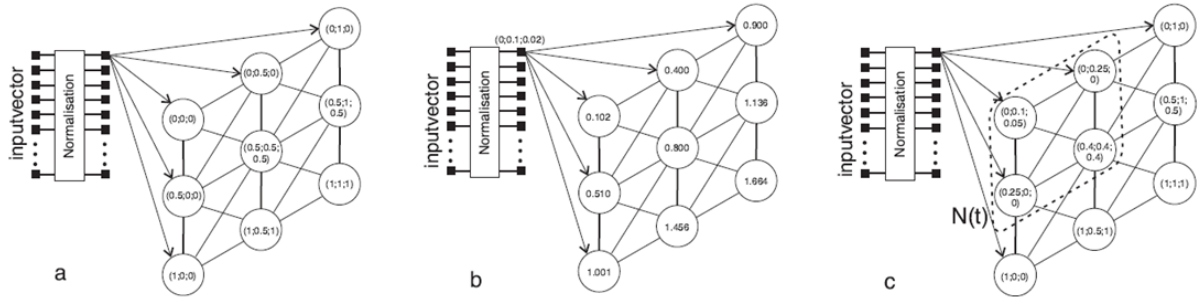


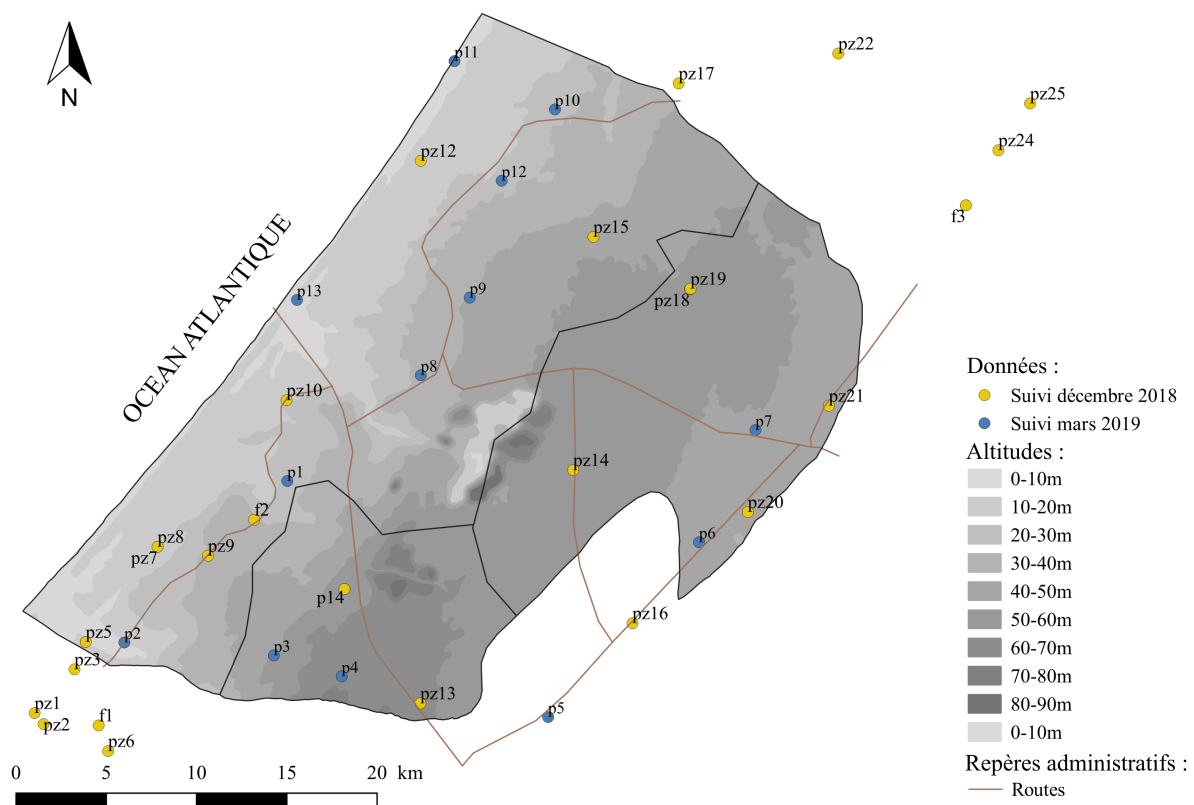
FIGURE 11 – Algorithme des SOM's (a = Répartition des vecteurs de référence ; b = Mesure de la distance Euclidienne par calcul ; c = Mise à jour des vecteurs de référence par rapport à la valeur de son voisin $N(t)$).

4 Résultats

4.1 Acquisition des données

Le réseau est délimité dans trois communes : Darou Khoudoss, Taïba Ndiaye et Méouane de la région de Thiès. Cette zone longe la côte pendant une quarantaine de kilomètres sur une bande de 30km perpendiculairement au littoral, avec une superficie de 972km². La DGPRES a déjà mis en place un réseau d'une centaine de piézomètres, puits et forages répartis sur l'ensemble de la zone des Niayes. Treize d'entre eux se situent dans la région étudiée. La DGPRES s'occupe d'effectuer un suivi piézométrique et hydrochimique plusieurs fois par an. Lors du terrain réalisé en mars-avril 2019, un réseau de 13 puits supplémentaires a été établi afin de renforcer le réseau pré-existant. La localisation de ces puits a été choisie selon l'emplacement, l'accessibilité, et la diversité d'utilisation des différents puits.

A l'aide du GPS différentiel, les localisations exactes des puits ont pu être établies en coordonnées x y et z et ainsi rassemblées dans un système d'information géographique QGIS 2.18.13 de projection WGS84/UTM Zone 28N. La localisation géographique de ces puits peut être représentée sur la figure 12.



villages se situant à proximité des ICS sont alimentés en eau par les forages de l'industrie. Leurs puits villageois sont donc laissés à l'abandon rebouchés par des déchets ou mis à secs. De plus, tous les villages se trouvant à proximité de la route reliant Louga à Dakar, sont alimentés en eau par un forage. La capitale est alimentée par les eaux du lac de Guiers et les canalisations passent à proximité de la route nationale N2, permettant ainsi aux villages environnant de profiter de cette eau de meilleure qualité.

Les données de terrain ont été prises lors de la campagne du 15 mars au 10 avril 2019 accompagnée par Aziz Gning. Premièrement, une campagne d'identification du réseau a été effectuée, en demandant l'accord aux chefs des villages de l'accès afin de recueillir un maximum d'informations supplémentaires quant à l'utilisation des eaux du puits et du contexte environnant. Ensuite, les paramètres physico-chimiques ont été mesurés sur l'ensemble du réseau, ainsi que les mesures piézométriques. Pour clôturer, une campagne de nivellement a été réalisée accompagnée par Aziz Gning et de collègues de la DGPRE.

4.2 Traitement des données

Les analyses des échantillons ont été effectuées au laboratoire de chimie de l'Université de Liège au département de géologie du B18 par Joël Otten le 29/04/2019 et 30/04/2019. L'ensemble ces résultats sont répertoriés dans l'annexe 9, pour les données de localisation, l'annexe 10 pour les paramètres physico-chimiques de laboratoire et de terrain, l'annexe 11, 12 et 13 pour les valeurs obtenues suite aux analyses de laboratoire.

Préparation : Pour l'analyse des échantillons, l'eau ne doit pas avoir d'éléments solides en suspension. Après 6 jours de décantation, seul l'échantillon p1 a eu besoin d'être filtré car les éléments présents sont restés en suspension dans la solution, tandis que les dépôts du reste des échantillons se sont déposés au fond de la bouteille. Grâce à une pompe *Millipore*, et un pré-filtre, nous avons pu obtenir une solution sans impuretés, ni éléments solides.

4.2.1 Potentiométrie

Principe :

La potentiométrie est une méthode d'analyse physico-chimique quantitative. Il s'agit d'une méthode analytique permettant de relier le potentiel d'une solution de manière passive entre une électrode de référence (potentiel constant) et une électrode indicatrice mesurant l'activité des espèces de notre solution. Cette différence de potentiel permet de mesurer le pH et la conductivité électrique grâce à une électrode à membrane de verre, composée d'une membrane sensible à l'ion H^+ (Durand, 2010).

Méthodologie :

La potentiométrie est la première mesure à être réalisée car les paramètres pourraient légèrement varier par réaction avec l'atmosphère environnant, et pourront également être utiles pour les analyses de

chromatographie ionique. Le passeur utilisé pour les manipulations est le 815 Robotic USB Sample Processor XL de Metrohm, avec comme modèle de titration une électrode au calcium et une électrode pH 905 Titrando et comme modèle de conductivité le 856 Conductivity module. Les étapes réalisées avec cet appareil sont décrites ci-dessous :

1. Des échantillons de 60mL ont été prélevés et insérés dans l'appareillage.
2. Un titrage complexiométrique a été réalisé à l'aide d'une solution titrante. Celle-ci est composée de 19,0137g de EGTA - Ethylènebis (Oxyéthylène)triacétique acid, 1,2Bis-(2-Aminoéthoxyéthyl)-N,N,N', de 7,6g de NaOH - Hydroxyde de Sodium et d'eau déminéralisée, préparée dans une fiole jaugée de 1000mL. Le NaOH est rajouté à l'EGTA pour rendre la solution basique. En effet, le calcium présent dans la solution à analyser ne peut former un complexe avec l'EGTA uniquement un milieu basique.
3. La solution tampon est préparée à base de 24,228g de TRIS-hydroxyméthyl aminométhane - $\text{H}_2\text{NC}(\text{CH}_2\text{OH})_3$, d'une molarité de 121,14g/mol et d'eau déminéralisée dans une fiole jaugée de 1000mL. Cela nous donne une solution relativement neutre, de pH = 6.

Traitement des données :

Le traitement de données se fait sur le programme Tiamo 2.5. Lors du titrage potentiométrique, une courbe d'évolution va se former à l'écran. Lorsque la courbe se met à inflexer, cela signifie que l'EGTA n'a plus assez de calcium avec qui complexer.

4.2.2 Chromatographie ionique

Principe :

La chromatographie ionique joue un rôle primordial quand à l'analyse d'eaux souterraines. Elle permet de calculer la concentration d'espèces ioniques présente dans un échantillon liquide dépourvu de matière en suspension (Caudron & Padreau, 2010). Il s'agit d'une méthode qualitative et quantitative, rapide, sensible et précise (Caudron & Padreau, 2010). Il s'agit d'un échange d'ions entre une phase solide (une résine) et une phase liquide (l'éluant) (Caudron & Padreau, 2010). L'éluant permet le transport des espèces ioniques présentes dans notre échantillon jusqu'au site d'échange.

Méthodologie :

La chromatographie ionique est effectuée sur l'appareil 850 Professional IC de Metrohm. Celui-ci est composé de deux boucles fonctionnant en parallèle, afin d'analyser la concentration en cations et en anions de manière indépendante.

L'échantillon est injecté dans chacune des boucles suite à un système de pompe péristaltique. La solution va ensuite passer dans la colonne chromatographique composée d'une résine, permettant de retenir partiellement les éléments présents dans l'échantillon. Ces colonnes résineuses ne sont pas pareilles dans les deux circuits. Pour les cations, il s'agit de la résine METROSup C 4 composée de gel de silice avec des groupements carboxylique, et pour les anions de la résine METROSepA Supp 7 composée d'alcool polyvinylique avec groupe ammonium quaternaire diamètre des particules 5 μ m.

Pendant le passage de la solution, on va également faire circuler un éluant, afin de libérer progressivement toutes les charges adsorbées par la résine. L'éluant pour les cations est composé d'acide nitrique ($C_6H_8O_7$) 1,7 mmol/L, d'acide 2,6-Pyridinedicarboxylic ($C_7H_5NO_4$) 0,8 mmol/L et d'eau déminéralisée ultra pure de 18,2 M Ω , étant la résistivité la plus élevée pour l'eau. L'éluant des anions, lui, est composé de carbonate de calcium ($CaCO_3$) 72 mmol/L dilué 20 fois pour obtenir une solution de 3,6 mmol/L. Les éléments auront des affinités variables avec ces résines et auront ainsi des temps d'élution différents avec une arrivée progressive au niveau du détecteur conductimétrique.

Traitement des données :

Les données sont traitées en direct grâce au programme MagIC Net 3.1. Deux graphes en ressortent, un pour les anions et un pour les cations. Sur ces graphes, différents pics de concentration apparaissent distinctement à différents temps d'élution dépendant directement du temps de rétention du composé avec la résine ainsi que la vitesse de déplacement de ceux-ci dans la colonne (Caudron & Padreau, 2010). Grâce à des standards définis, dépendant des conditions du milieu et de la composition de la résine, le pic arrivant à un moment précis correspond à un certain composé (Caude & Jardy, 1996). En calculant l'aire de la surface sous la courbe de ce pic, on déterminera la concentration en cet élément dans l'échantillon analysé.

4.2.3 Spectrométrie d'absorption atomique

Principe :

La spectrométrie d'absorption atomique permet de déterminer la concentration en métaux et métalloïdes dans un échantillon liquide de manière qualitative et quantitative. Le principe est d'envoyer des photons d'énergie $h\nu$ sur un nuage d'atomes à l'état fondamental E_0 . Ce nuage atomique est éclairé par un rayonnement lumineux d'intensité I_0 . Lors du passage de lumière à travers ce nuage atomique, les atomes vont absorber une partie de cette intensité lumineuse de telle manière que, à la sortie, l'intensité sera égale à I (Vandegans et al., 1997). La longueur d'onde ne change pas. Selon Vandegans et al., 1997, l'**absorbance A** est définie telle que :

$$A = \log(I_0/I) \quad (8)$$

Il a également été démontré que l'absorbance obéit à la loi de proportionnalité de la loi de Beer-Lambert (Vandegans et al., 1997) :

$$A = K.l.N_0 \quad (9)$$

où A est l'absorbance, K est le coefficient d'absorption, l est la longueur du chemin optique dans l'atomiseur et N_0 est le nombre d'atomes à l'état fondamental par unité de volume dans l'atomiseur. En reliant les formules (8) et (9), on obtient (Vandegans et al., 1997) :

$$A = \log(I_0/I) = k_1.C \quad (10)$$

où k_1 est une constante et C est la concentration de la solution étudiée. On remarque donc que l'absorption est proportionnelle à la concentration et ne dépend pas de l'intensité incidente I_0 (Vandegans et al., 1997).

Méthodologie :

Dans le cadre de cette étude, seuls les éléments de fer et silice ont été analysés. Les analyses sont effectuées sur l'appareil novAA 400 de analytikjena selon les étapes suivantes :

1. L'échantillon liquide est aspiré par capillarité jusqu'au niveau d'un nébuliseur dont le but est de produire un aérosol, solution+gaz.
2. Ce mélange, composé d'ions, va ensuite passer dans l'atomiseur dont le rôle est de produire un nuage d'atomes à l'état fondamental. Celui-ci est composé d'un gaz inflammable d'acétylène (C_2H_2) ainsi que d'un oxydant, composé de protoxyde d'azote (N_2O) pour l'analyse de la silice, pouvant donner des températures proches de $3175^{\circ}C$ et d'air (H_2O) pour le fer, donnant des températures de $2500^{\circ}C$. La silice étant un élément réfractaire, elle a besoin d'avantage d'énergie pour se faire atomiser à haute température.
3. Simultanément, une lampe à cathode creuse de longueur d'onde caractéristique de l'élément à doser va émettre un faisceau lumineux en direction de l'échantillon. La longueur d'onde émise pour le fer est de $248,3nm$ et pour la silice de $251,6nm$. En effet, ces deux éléments absorbent respectivement ces longueurs d'onde précises. Plus l'échantillon a une grande concentration en cet ion, plus il absorbera de photons provenant de la source lumineuse. Un détecteur permet donc de mesurer ensuite cette intensité d'énergie transmise et de comparer avec l'énergie incidente.

Traitement des donnée :

Le traitement des données se fait sur le programme WinAAS Ver 4.7.7.0.

4.3 Caractérisation hydrodynamique

4.3.1 Carte piézométrique

Les altitudes piézométriques ont été mesurés à deux périodes différentes, et par des équipes différentes. Sur la carte piézométrique (figure 13), le suivi de décembre 2018 à été réalisé par une équipe de la DGPPE, tandis que celui de mars 2019 à été mesuré avec l'aide de Aziz Gning. Il se pourrait qu'il y aie des variations dues aux 3 mois séparant la prise de données, mais ces altitudes piézométriques peuvent également varier en fonction de l'heure de la journée et de la quantité d'eau prélevée durant la journée. Cette carte est donc une carte piézométrique théorique. Tous les échantillons de la campagne de mars 2019 ont été repris, à l'exception du puits p11 qui à rencontré des problèmes de calculs lors du nivellement.

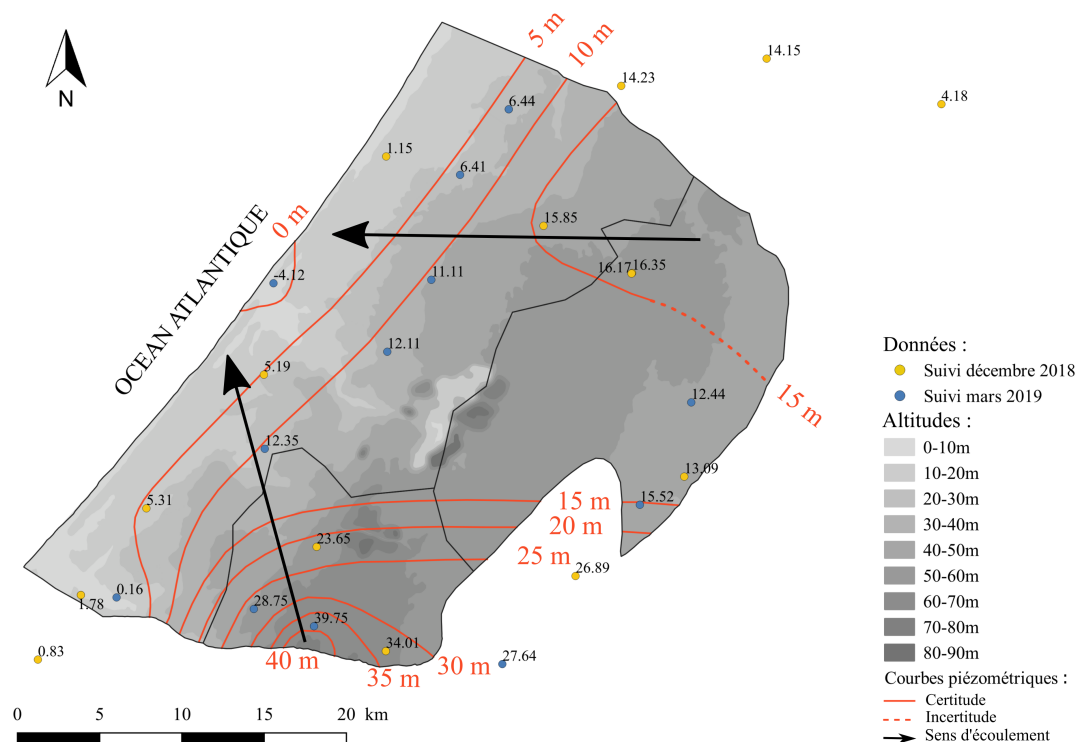


FIGURE 13 – Carte piézométrique théorique de la zone d'étude ; avec en jaune : mesures prises en décembre 2018 par la DGPPE ; en bleu : mesures prises en mars 2019.

Grâce à cette carte, on a pu définir le sens d'écoulement des eaux qui, dans la partie Sud de la zone d'étude, va du sud vers le nord et dans la partie Nord, plutôt de l'est vers l'ouest. Les eaux s'écoulent donc globalement selon la topographie, en direction de l'océan Atlantique. Un dôme piézométrique est observé dans la commune de Taiba Ndiaye, avec des altitudes atteignant 40 mètres. Cette carte permet aussi de mettre en évidence l'importance de la mine de phosphate dans la région et le rôle qu'elle joue sur la nappe d'eau souterraine. En effet, cette industrie minière est située au milieu de la zone d'étude, et on peut observer un rabattement de la nappe localement suite à du pompage intensif.

4.3.2 Suivi piézométrique de la zone au cours du temps

La dernière étude piézométrique à l'échelle de la zone des Niayes toute entière a été réalisée lors de la mission du PADEN en 2013 pour les ouvrages du Littoral Nord, regroupant les bases de données CHRONO de la DGPPE ainsi que les données de mission de suivi piézométrique de la DGPPE (DGPPE, 2014). L'objectif de ce bilan de mesure est d'analyser les tendances majeures du niveau des nappes (DGPPE, 2014).

L'aquifère des sables du Quaternaire est actuellement à un niveau piézométrique très bas. Selon DGPPE, 2014, en 1958 le niveau moyen de la nappe était à 55m et en 1994, plus qu'à 22m. Entre 2013 et 2014, le niveau piézométrique a diminué de 4 à 15cm dans l'aquifère du Quaternaire, de 11 à 21cm pour l'Eocène, de 46 à 60cm pour le Paléocène et 6 à 72cm pour le Maastrichtien (DGPPE, 2014).

Les causes de la baisse des eaux sont diverses (DGPRES, 2014) :

- La diminution de la pluviométrie, celle-ci étant la seule source d'alimentation pour les nappes de cette région du Sénégal ;
- L'augmentation de la population provoquant une augmentation des forages à usage domestiques ;
- L'augmentation d'activités minières et agricoles étant de grands consommateurs d'eau.

4.4 Caractérisation hydrochimique

4.4.1 Hydrochimie générale

Détermination des balances ioniques

Le calcul des balances ioniques doit être réalisé avant l'interprétation des résultats de chaque échantillon et ce, afin de vérifier la fiabilité des données des analyses de laboratoire sur les éléments majeurs (Choi et al., 2014) par chromatographie ionique (voir section 4.2.2 - *Chromatographie ionique*).

La formule appliquée pour calculer les balances ioniques est la suivante (Choi et al., 2014 ; Mandel, 2012) :

$$BI = 100 \cdot \frac{\sum cations - \sum anions}{\sum cations + \sum anions} \quad (11)$$

On peut classer les valeurs obtenues (annexe 5) en 3 niveaux différents :

- $0 < BI < \pm 1\%$: 2 échantillons (p12 et p13).
- $\pm 1\% < BI < \pm 3\%$: 10 échantillons.
- $\pm 3\% < BI < \pm 5\%$: 1 échantillon (p1).

La valeur maximum de balance ionique est de +4,52 pour l'échantillon p1. Ce qui signifie que l'on obtient une excellente fiabilité pour l'entièreté de nos échantillons. Si cette valeur dépasse 10%, elle est considérée comme non-fiable et ne doit pas être prise en compte pour les calculs (Choi et al., 2014).

Coefficients de corrélation linéaire entre les éléments majeurs

Les coefficients de corrélation linéaire ont été calculés via le programme Rstudio 3.6.1. Rstudio est un langage de programmation permettant de réaliser des analyses statistiques sur une base de données afin de mettre en évidence des corrélations positives et négatives entre ces différentes informations (Allaire, 2012 ; Team, 2015 ; Wallach et al., 2014). Le code ayant permis la réalisation de la figure est reprise dans l'annexe 8.

Ces coefficients de corrélation linéaire ont été également calculés via le module "Statistique" implanté dans le programme « Diagramme » (Simler, 2006). Ils permettent de déterminer les relations potentielles existantes entre les paramètres chimiques des échantillons d'eau. Les résultats obtenus

sont illustrés dans l'annexe 14. Les valeurs en rouge représentent les éléments très corrélés (0,85 à 1,00), en jaune les éléments corrélés (0,70 à 0,85) et en vert les éléments peu corrélés (0,55 à 0,70). Cependant la première méthode avec le programme Rstudio a été représentée car elle permet d'avoir une représentation plus visuelle que la deuxième.

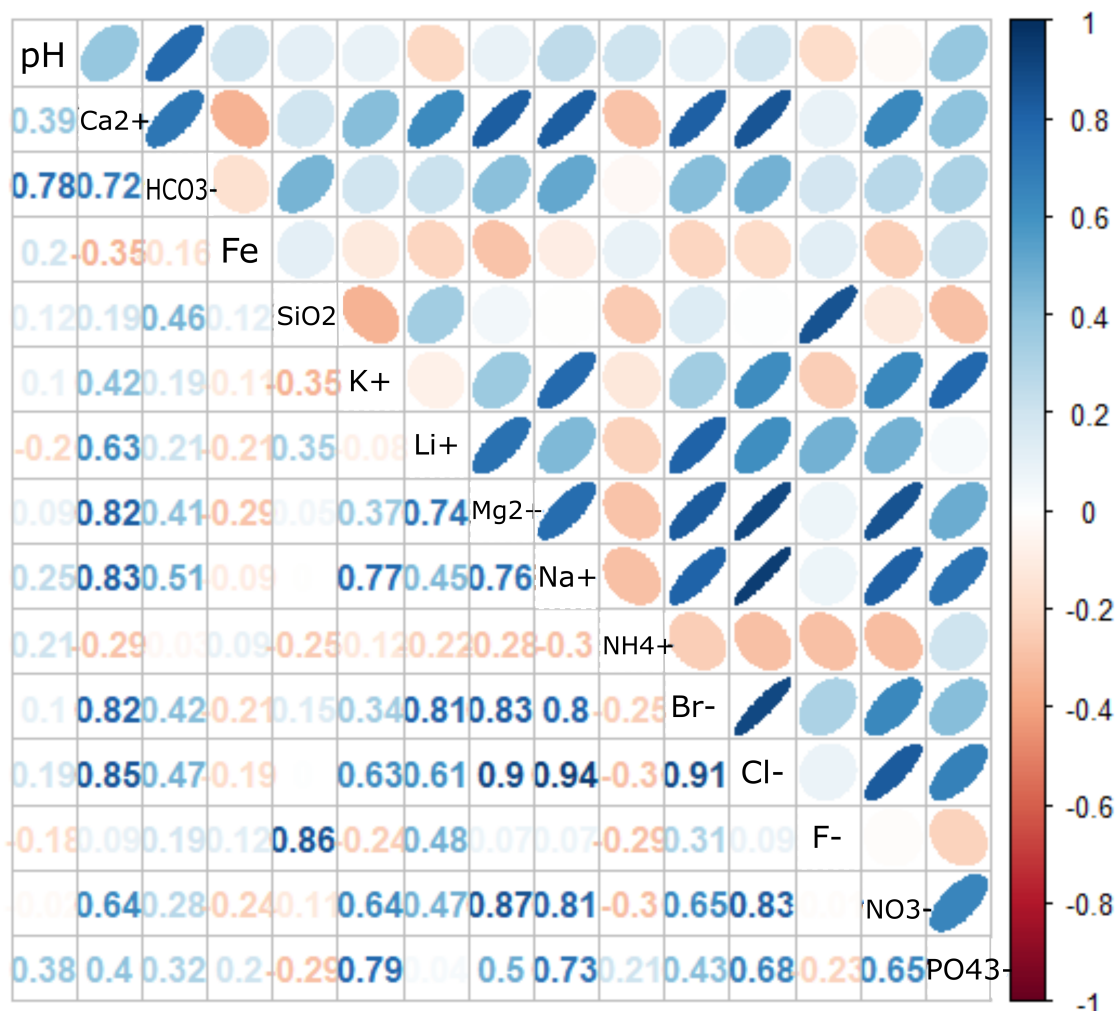


FIGURE 14 – Matrice de corrélation linéaire entre les éléments majeurs, avec en bleu, les corrélations positives, et en orange les corrélations négatives. Au plus, l'ellipse est fine, au plus il y a de corrélation.

Sur la figure 14, on peut constater :

- Une étroite corrélation entre les éléments Cl⁻, Na⁺, Mg²⁺, Ca²⁺ et Br⁻ ; particulièrement Br⁻ avec Cl⁻ ; Na⁺ avec Cl⁻ et Mg²⁺ avec Cl⁻.
- La faible corrélation positive entre le NH₄⁺ et Fe.
- La corrélation positive du K⁺ avec Na⁺, Cl⁻, NO₃⁻ et PO₄³⁻.
- Le lien étroit entre SiO₂ et F⁻.

Analyse statistique des variables

La table 1 présente un résumé statistique des paramètres physico-chimiques, dont le pH, la conductivité électrique, le potentiel d'oxydo-reduction (Eh), l'oxygène dissous et la température ont été mesurés sur le terrain, tandis que l'alcalinité (TAC), a été mesurée en laboratoire.

TABLE 1 – Tableau statistique des paramètres physico-chimiques.

	Minimum	Maximum	Moyenne	Médiane	Ecart-type
pH	4,44	7,66	6,53	7,00	1,06
Cond. el. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	413	2890	1252	963	827,14
Eh (mV)	-330,40	102,20	-123,86	-113,10	129,43
Ox. diss (mg/L)	0,61	5,43	3,63	3,63	1,30
T° de terrain (°C)	24,90	30,20	27,28	27,40	1,36
TAC (°f)	0,20	26,50	11,05	8,20	9,63

Le potentiel hydrogène varie entre 4,44 au niveau de Ndjiligne (p12) et 7,66 à Baiti Gueye (p3). Deux échantillons (p5 et p12) semblent particulièrement acides avec des pH entre 4,44 et 4,54 indiquant que le dioxyde de carbone (CO_2) est la forme dominante de carbone inorganique du milieu et pour le reste des échantillons, il semblerait que ce soit le bicarbonate (HCO_3^{2-}) (Drever, 1997; Marion, 1998).

La conductivité électrique est très élevée sur les bords de mer à Mboro-plage (p13) avec $1600\mu\text{S}/\text{cm}$ et Diogo-sur-mer (p11) avec $2840\mu\text{S}/\text{cm}$. Le puits p9 est également fort minéralisé avec une valeur de $2890\mu\text{S}/\text{cm}$. Le puits avec la plus faible minéralisation est le p6 à Diam Tiène avec une valeur de $413\mu\text{S}/\text{cm}$. L'origine de ces conductivités élevée sera discuté par la suite.

Seuls deux échantillons ont des valeurs positives pour le potentiel d'oxydo-réduction (p5 et p12) indiquant des eaux en milieu oxydant. Le reste des échantillons sont en milieu réducteur, avec un minima au niveau de p8 avec -330,4mV et de p7 avec -294,3mV.

L'oxygène dissous varie entre 0,61mg/L et 5,43mg/L avec une moyenne et une médiane à 3,63mg/l signifiant que l'ensemble des résultats est équilibré et ne possède pas d'échantillons disproportionnés venant influencer la moyenne.

La température est celle de l'échantillon lors de la prise des données physico-chimiques. Celle-ci est plus élevée lorsque le puits n'est pas en utilisation. Les eaux les plus froides proviennent des puits utilisés par l'agriculture, avec certainement un plus grand débit de renouvellement. La température minimale à été mesure au puits p1 à Santhie Ndong avec $24,90^\circ\text{C}$ et la température maximale au puits p5 de la localité de Yajine avec $30,20^\circ\text{C}$. Toutes les valeurs tournent autour de 26°C à 28°C .

Les valeurs de l'alcalinité (TAC) varient entre $0,20^\circ\text{f}$ et $26,50^\circ\text{f}$ avec une moyenne de $11,05^\circ\text{f}$ et une médiane de $8,20^\circ\text{f}$.

La table 2, présente un résumé statistique des teneurs en éléments majeurs et de la silice.

TABLE 2 – Tableau statistique des éléments majeurs.

	Minimum	Maximum	Moyenne	Médiane	Ecart-type
Ca^{2+}	13,62	208,42	84,91	61,78	61,55
HCO_3^-	3,34	317,15	132,68	99,09	114,64
CO_2	0,69	106,85	11,73	1,06	30,05
SiO_2	14,16	41,82	26,34	27,44	8,73
K^+	2,40	108,16	14,83	6,10	28,33
Mg^{2+}	2,76	83,74	23,27	17,90	21,28
Na^+	33,67	297,23	105,93	68,09	81,11
Cl^-	59,47	547,96	193,14	131,77	155,33
NO_3^-	0,79	400,14	129,41	103,13	141,83
SO_4^{2-}	8,35	315,10	67,67	21,37	88,86

On remarque que les concentrations en Ca^{2+} sont assez variables allant de 13,62mg/L au niveau de p1 et de 208,42mg/L au puits p9. Les concentrations en HCO_3^- varient de 3,34mg/L à 317,15mg/L, respectivement, au puits p4 et p5. Les concentrations en CO_2 varient entre 0,69mg/L et 106,85mg/L avec une moyenne de 11,73mg/L et une médiane de 1,06mg/L indiquant que la plupart des concentrations sont très faibles. Pour le SiO_2 , la moyenne et la médiane semblent relativement proche ainsi que les valeurs maximum et minimum étant de 14,16mg/L et 41,82mg/L. Le K^+ varie entre 2,40mg/L et 108,16mg/L. Lorsqu'on regarde le tableau statistique en table 2, on peut identifier l'homogénéité et la variabilité des éléments dans l'ensemble de la zone d'étude. L'ensemble des échantillons présentent une grande différence entre les concentrations minimums et maximums. Lorsqu'on regarde le CO_2 on remarque qu'un échantillon de valeur élevée a fait augmenter le maximum avec une valeur médiane et de moyenne faible. Le Mg^{2+} présente une médiane et une moyenne de valeur relativement proche, indiquant une homogénéité dans les résultats. Le reste des variables sont indiquées ci-dessus.

Distribution spatiale

Sur la figure 15a) représentant la distribution des phénomènes d'oxydo-réduction de la zone d'étude, on remarque que l'ensemble des eaux sont en milieu réducteur, et plus fortement aux niveaux du p4, p7 et p8. Les eaux souterraines des puits p5 et p12, semblent être oxydantes. Dans la figure 15b), le pH est relativement neutre sur l'ensemble de la zone, mis à part au niveau du puits p5 et p12 où les eaux étaient plus oxydantes. Quant à la conductivité électrique sur la figure 15c), celle-ci est plus élevée sur les deux puits localisés en bordure de l'océan, mais aussi le puits p4 et p9 situés plus dans les terres.

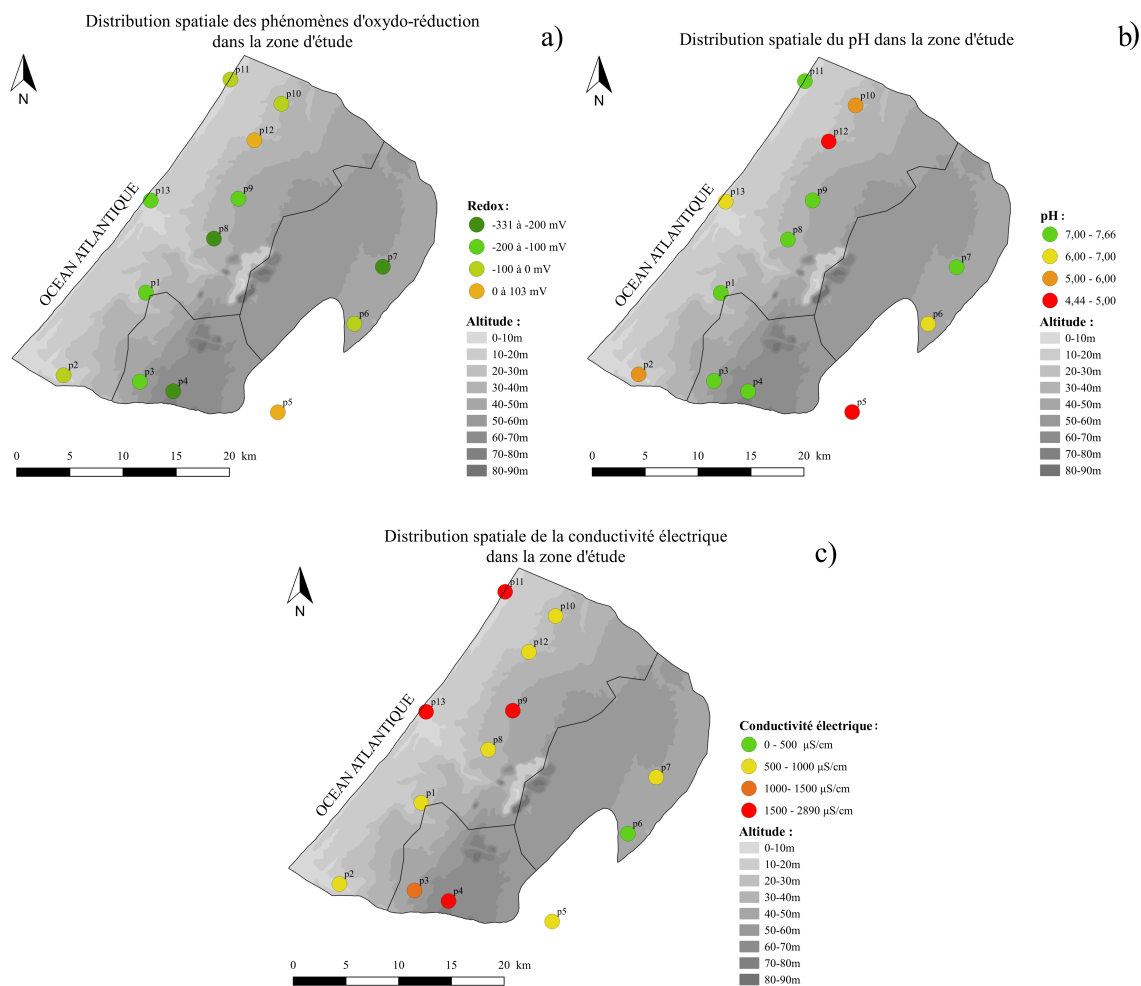


FIGURE 15 – Répartition spatiale a) des processus d'oxydo-réduction; b) du pH; c) de la conductivité électrique; des eaux souterraines de la zone d'étude.

Dans la figure 16a) de la répartition spatiale en phosphate, on remarque que deux puits, p9 et p11, dépassent les normes de potabilité définies par l'OMS avec des valeurs allant de 1,00mg/L à 1,66mg/L et les puits p1, p4 et p8 sont à la limite d'admissibilité avec des valeurs situées entre 0,12mg et 1,00mg. Sur la figure 16b), on observe une contamination en nitrate supérieur aux normes de potabilité de l'OMS pour 6 puits, p2, p4, p9, p10, p11 et p12 avec des valeurs variant entre 100,00mg/L et 400,14mg/L. Sur la figure 16 de la répartition en sulfate, seul le puit p13 est au dessus des normales de potabilisation de l'OMS, et les puits p4, p11 et p12, sont à la limite d'admissibilité avec des valeurs variant entre 250,0 et 315,1mg/L. Les valeurs du chlore sur la figure 16d) par rapport à l'eau potable est uniquement trop élevée au niveau du puits p13 avec une concentration de 315,10mg/L mais les puits p4, p11 et p12 sont également impacté par ces ions Cl^- avec des concentrations variant entre 100mg/L et 250mg/L. Une contamination en ammonium se fait remarquer au niveau du puits p8 avec une concentration de 12,30mg/L, voir figure 16e), associé avec une faible contamination en fer sur ce même puits visible sur la figure 16f). Le NH_4^+ est aussi présent sur les puits p1 avec 2,42mg/L, p13 avec 1,34mg/L, p12 avec 0,74mg/L et ainsi que p10 avec 0,45mg/L. La carte de distribution du fer montre que l'ensemble des puits n'est pas contaminé par du fer, excepté pour le puits p8.

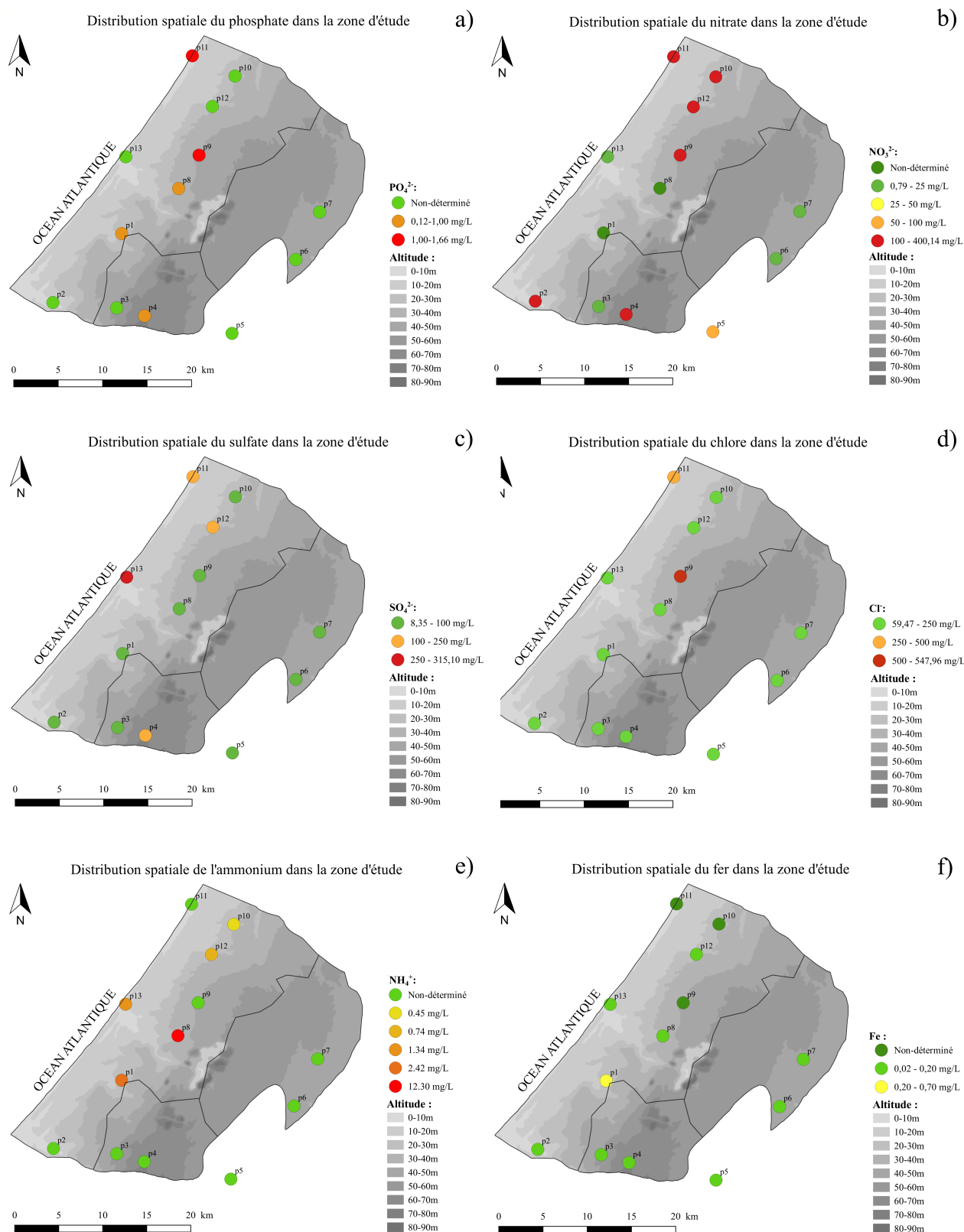


FIGURE 16 – Répartition spatiale a) du phosphate ; b) du nitrate ; c) du sulfate ; d) du chlorure ; e) de l'ammoniaque ; f) du fer ; des eaux souterraines de la zone d'étude.

Détermination des hydrofaciès

Afin d'obtenir une classification hydrochimique des eaux de la région de Mboro, un diagramme de Piper a été réalisé afin de déterminer les différents faciès de la nappe d'eau dans la région de Mboro. Celui-ci a été réalisé grâce au programme informatique "Diagrammes 5.1." du Laboratoire Hydrogéologique d'Avignon en France (Simler, 2006). Les éléments pris en compte sont Ca^{2+} , Mg^{2+} et $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$ pour les cations et HCO_3^- , $(\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-)$ et SO_4^{2-} pour les anions (Oga et al., 2009).

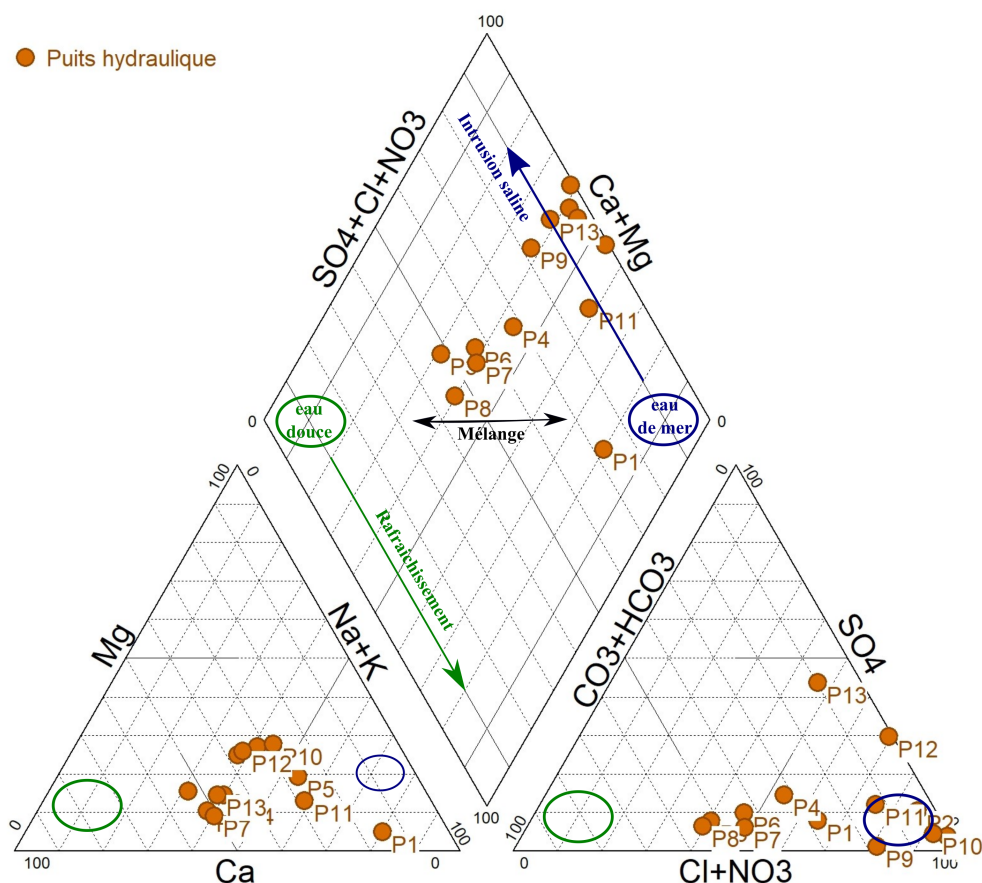


FIGURE 17 – Diagramme de Piper de l'ensemble des échantillons de la zone d'étude de la campagne de mars 2019.

Le diagramme de Piper montre que les eaux ont principalement un faciès chloruré, calcique sodique-potassique. Ce faciès est typique des environnements côtiers (Najib et al., 2017). Selon (Piper, 1944), lorsque les ions se trouvent dans les coins de droite, cela correspond à une salinité primaire (alcaline non carbonatée) ayant une origine marine. Les données reçues sont présentées dans le tableau en annexes 12 et 13. Le phénomène d'intrusion saline est caractérisée par l'augmentation de Ca^{2+} en solution suite à l'adsorption de Na^+ sur le substrat rocheux. Le cas inverse désigne un rafraîchissement des eaux.

Grâce aux diagrammes de Stiff de la figure 18 (et de l'annexes 15), on remarque que 4 puits (p4, p9, p11 et p13) présentent une minéralisation plus importante en Na+K et Cl, contrairement au reste des puits qui présentent une minéralisation faible.

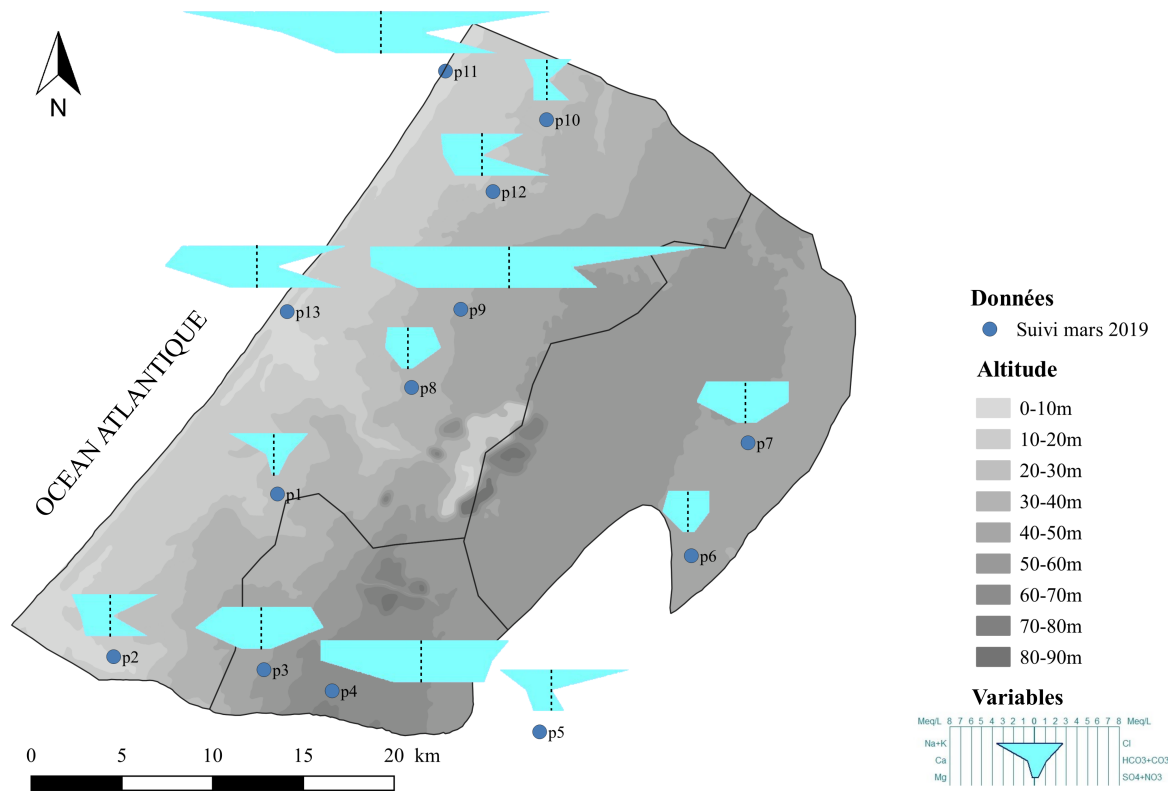


FIGURE 18 – Diagrammes de Stiff localisés sur la région de Mboro.

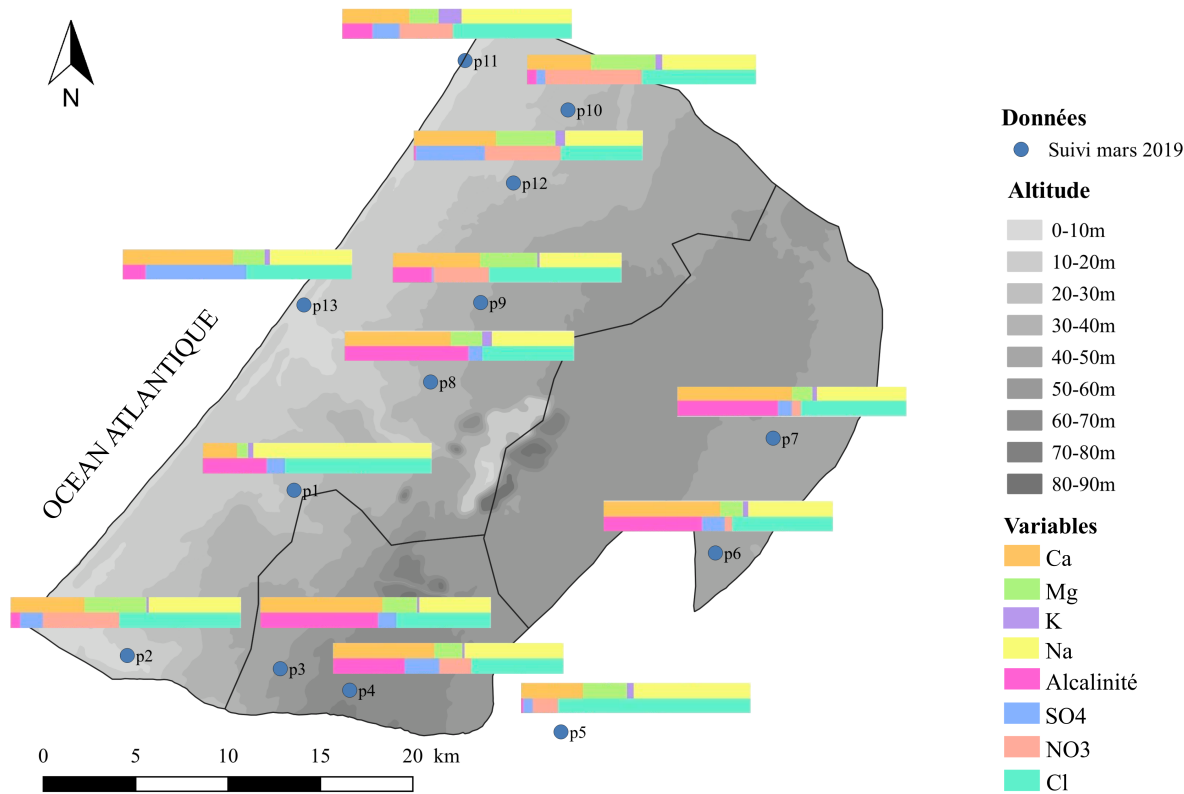


FIGURE 19 – Diagrammes de Stabler localisés sur la région de Mboro.

Les diagrammes de Stabler ne nous donnent pas des informations quantitatives mais une proportion entre les différents éléments. Comme on peut le voir dans la figure 19 (et en annexe 16), l'alcalinité semble prendre une place plus importante dans le milieu de la zone d'étude (p1, p3, p4, p6, p7 et p8), autour de la mine des ICS. L'ensemble des puits semblent présenter une majorité en Na, Ca et Cl.

Lorsqu'on se penche sur le diagramme de Schoeller-Berkaloff (Annexe 17), 5 échantillons, tels que p2, p5, p10 et p12, ressortent avec de mêmes caractéristiques tel qu'une faible concentration en HCO_3^- et une valeur de Mg^+ en moins faibles par rapport au Ca et $\text{Na}+\text{K}$ que les autres échantillons (18). Ces deux groupes sont représentés à l'annexe 18 et sont également décrits et représentés sur la figure 21.

Indices de saturation

Pour les minéraux carbonatés, leur indice de saturation varie fort d'un échantillon à l'autre. Pour la calcite, celui-ci varie entre -4,31 et 1,40 et pour la dolomite, entre -8,73 et 2,79. Les eaux souterraines au niveau des puits p1, p2, p5, p10 et p12 sont en sous-saturation, celles des puits p6, p8, et p13 sont à l'équilibre et pour les puits p3, p4, p7, p9 et p11, en sur-saturation.

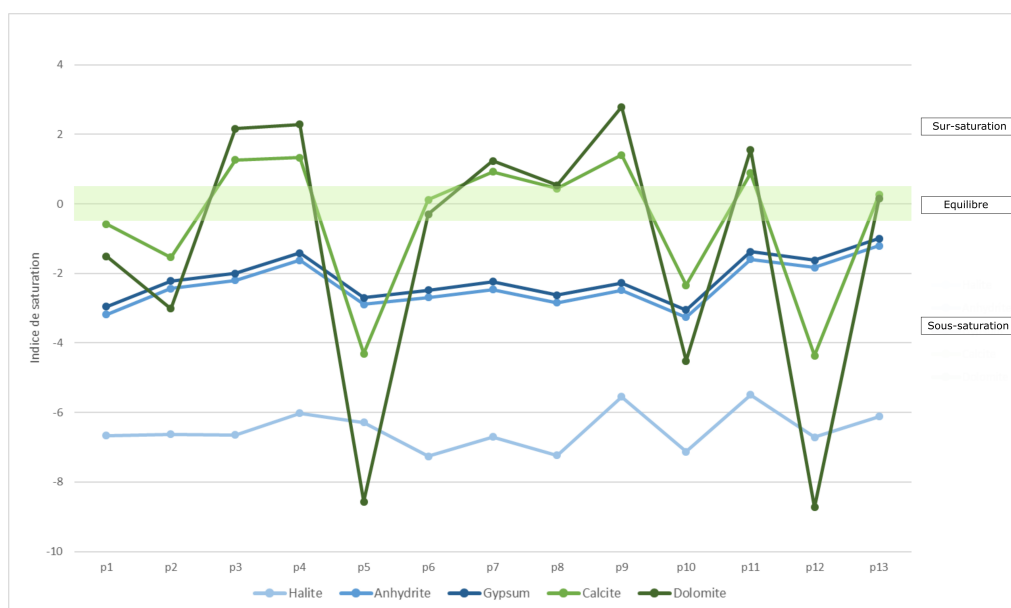


FIGURE 20 – Indices de saturation pour chaque échantillon, avec en vert clair, la zone d'équilibre des minéraux en solution.

En analysant les minéraux évaporitiques, on aperçoit que l'indice de saturation varie de -3,26 à -1,21 pour l'anhydrite et de -3,05 à -1,00 pour le gypse. Pour la halite, l'indice de saturation varie entre -7,26 et -5,49. Les trois minéraux sont en sous-saturation en solution. La halite, étant, largement plus négative, cela pouvant être dû à une intense évaporation saisonnière et par des remontées capillaire de la nappe dans les tranches du sol (Idder et al., p. d.), ou alors n'est tout simplement pas présente en solution.

L'application des indices de saturation pour les différents minéraux présents dans les eaux nous montre l'ordre de précipitation des ces minéraux avec, en premier lieu, la précipitation des carbonates (excepté pour les p2, p5, p10 et p12) ensuite celle des minéraux évaporitiques et enfin, celle de la halite. On peut également en conclure que la halite n'est pas du tout présente en solution. Le gypse et l'anhydrite ne semblent pas avoir d'impact dans la minéralisation des eaux. Les minéraux carbonatés, eux, sont bien en sur-saturation pour les échantillons p3, p4, p7, p9 et p11.

A partir de ces indices de saturation, le diagramme de l'indice de saturation de la calcite (ISC) par rapport à l'indice de saturation de la dolomite (ISD) peut être réalisé (figure 21), permettant de donner des informations sur la durée de séjour de l'eau (par rapport à leurs âges relatifs), sur la perméabilité des aquifères ainsi que sur la vitesse de circulation des eaux dans ces nappes (Oga et al., 2009).

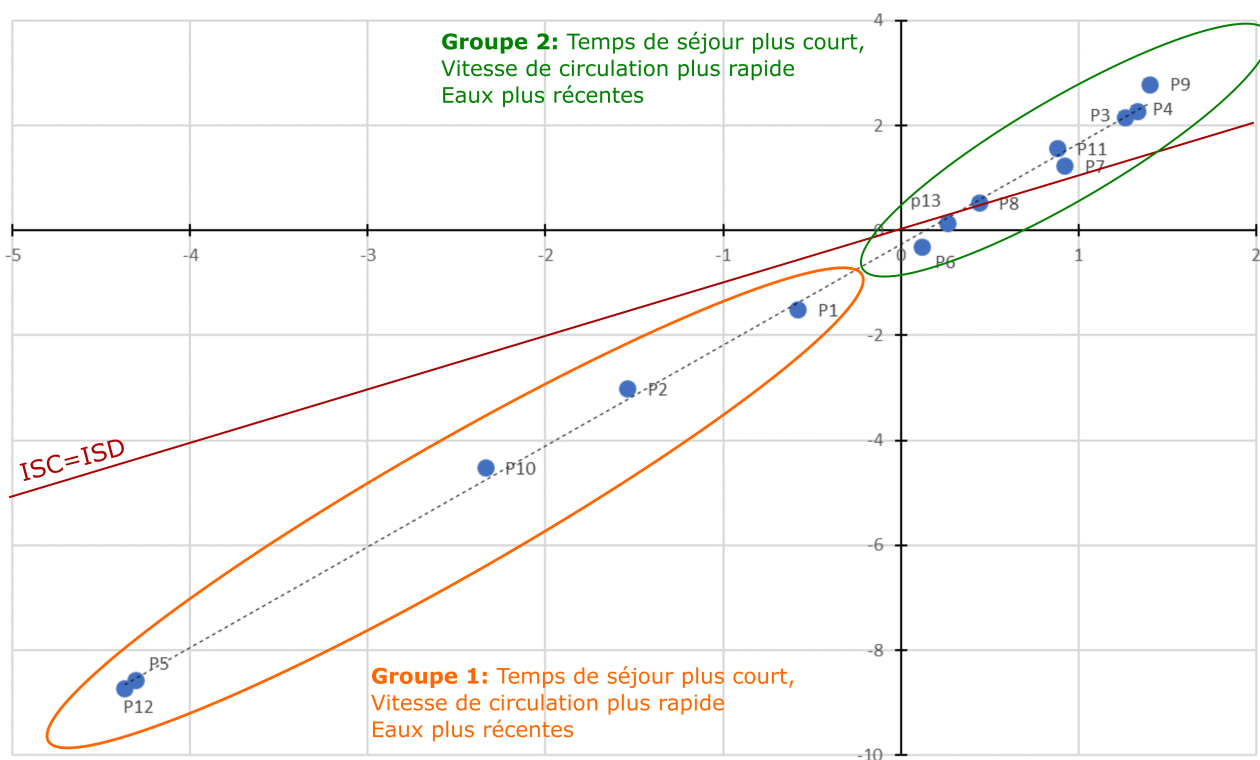


FIGURE 21 – Diagramme de comparaison des indices de saturation de la calcite (ISC) en fonction des indices de saturation de la dolomite (ISD) avec en rouge : la droite d'équilibre entre ISC et ISD ; en vert : les eaux plus âgées ; en orange : les eaux plus récentes.

Les processus de dissolution et précipitation dans les eaux sont des phénomènes très lents. Ceux-ci vont dépendre de la teneur en CO_2 dissout dans l'eau. Une faible quantité de CO_2 peut induire la précipitation du minéral (12), tandis qu'inversement, une grande quantité en CO_2 peut mener à la dissolution du minéral (13). Les réactions ci-dessous sont celles pour la calcite. Pour la dolomite, les formules sont similaires, mais où le Ca et Mg se partageant le même site.



La majorité des échantillons se retrouvent en sur-saturation, tel que l'ISC et l'ISD sont tous les deux positifs. L'autre moitié, tous situés en sous-saturation avec des ISC et ISD négatifs. Les échantillons ont été classés en 2 ensembles de points :

Groupe 1 : Cinq échantillons p1, p2, p5, p10 et p12. Ils sont davantage en sous-saturation vis-à-vis de la calcite (ISC $\ll 0$) et de la dolomite (ISD $\ll 0$). Lorsqu'on compare avec la figure 20, on remarque que ces trois puits sont ceux avec les indices de saturation des carbonates les plus bas. Cet ensemble est caractérisé par un temps de séjour court des eaux dans le sol suite à une vitesse de circulation rapide. Les eaux de ces échantillons sont les plus récentes de l'ensemble des analyses.

Groupe 2 : Dans cet ensemble on y retrouve les 8 échantillons restants. La plupart des échantillons, p3, p4, p7, p9, p11, sont en sur-saturation hydrochimique vis-à-vis de la calcite et de la dolomite. Les eaux des puits p6, p8 et p13 sont à l'équilibre hydrochimique, étant donné que leurs indices de saturation sont dans une marge de $\pm 0,5$ tel que $(-0,5 < \text{ISC} < +0,5)$ et $(-0,5 < \text{ISD} < +0,5)$ (Droubi et al., 1976). Ce groupe est caractérisé par un temps de séjour plus long dans la nappe suite à une vitesse de circulation plus lente. Ces eaux ont des âges relativement supérieurs au groupe 1.

Echanges ioniques de base

La projection de $[(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-)]$ en fonction de $[(\text{Na}^+ + \text{K}^+) - (\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-)]$ montre une tendance de pente -1, mettant en évidence la présence d'échanges de bases (Abid et al., 2011). Le choix de cette représentation graphique permet d'éliminer les probables autres sources ioniques (Dedjell, 2015). Les échanges de bases sont des réactions ayant lieu entre l'eau et les roches. Il s'agit de la libération de Na^+ et K^+ des formations argileuses contre la fixation de Ca^{2+} et Mg^{2+} de l'eau (Florent et al., p. d.), ou inversement (voir section 3.3.3 - *Echanges ioniques*). Dans le cas de la zone d'étude, les formations argileuses se trouvent dans les couches du Maastrichtien et de l'Eocène inférieur.

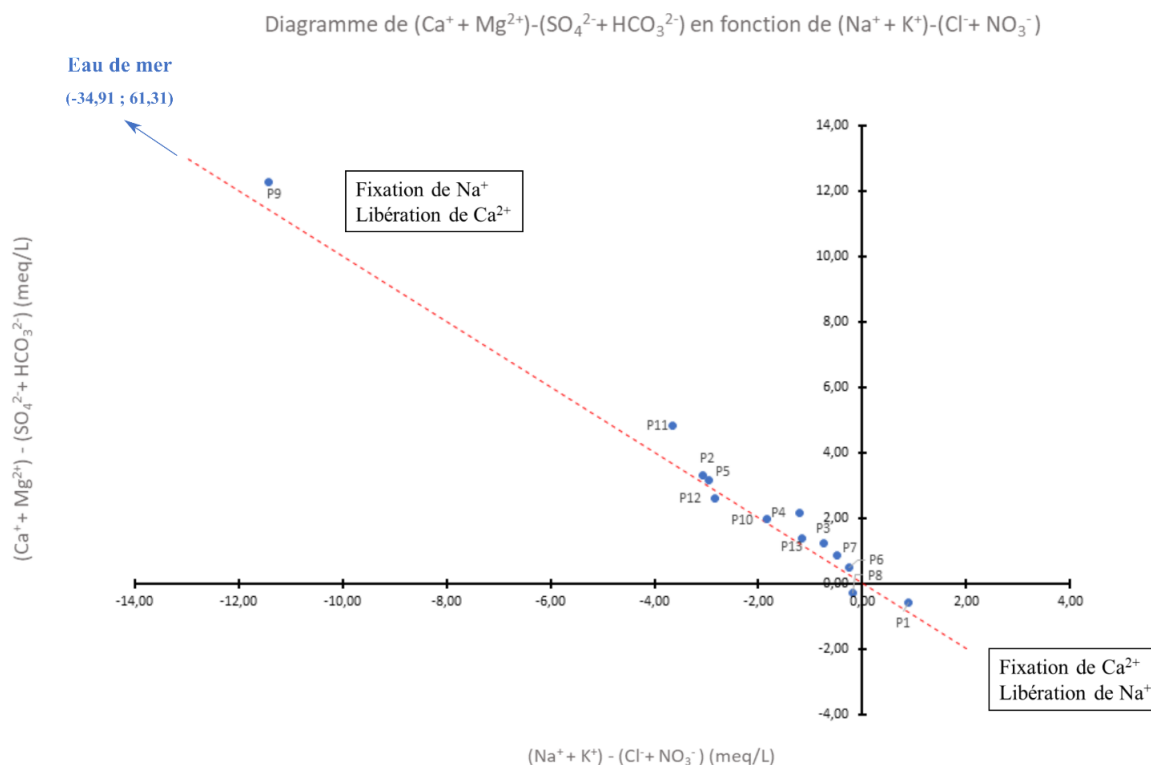


FIGURE 22 – Diagramme d’échanges de bases de $(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (SO_4^{2-} + HCO_3^{2-})$ en fonction de $(Na^{+} + K^{+}) - (Cl^{-} + NO_3^{-})$; avec en rouge, la ligne de pente -1 ; en bleu clair : la direction de la composition de l’eau de mer.

Sur la figure 22, tous les échantillons semblent montrer la présence d’échanges ioniques. Les éléments se retrouvent dans la partie supérieure gauche du graphique, indiquant la libération du Ca^{2+} suite à la fixation de Na^{+} , pouvant signifier une la présence d’une intrusion marine (voir figure 10 -> *Echanges ioniques*). Cependant, lorsque l’on compare les concentrations des eaux de la zone d’étude avec celle de l’eau de mer (Gning, 2015), (annexe 14), on remarque que les concentrations sont loin d’être comparables, ce qui signifie que l’apport d’eau marine dans les eaux souterraines est très faible.

4.4.2 Origine de la salinité

Les ions Cl, Br et Na sont largement utilisés dans la littérature comme géotraceurs de l’origine de la salinité (Abid et al., 2011 ; Edmunds et al., 2003 ; Leisen et al., 2012) car le chlore et le bromure sont des éléments peu abondants dans les minéraux (sauf le Cl dans les évaporites), sont conservatifs en solution (pas de processus d’oxydo-réduction et ne forme pas de précipité soluble) et ne fractionnent pas pendant l’interaction roche/fluide (Leisen et al., 2012). Ils sont donc utilisés comme traceurs conservateurs des environnements aqueux naturels (Edmunds et al., 2003 ; Fetter et al., 1993). Deux méthodes proposées sont utilisées pour déterminer cette origine, le rapport de Na^{+} sur Cl^{-} et celui de Br^{-} sur Cl^{-} .

A. Na^+ et Cl^-

La première méthode se base sur le rapport entre Na^+ et Cl^- et permet de déterminer l'origine de la salinité des eaux souterraines dans les régions arides ou semi-arides (Abid et al., 2011 ; Dixon & Chiswell, 1992 ; Magaritz et al., 1981). Si la salinité provient majoritairement de la dissolution de la halite, le rapport Na/Cl sera égal à 1, car celui-ci libère la même quantité de Na^+ que de Cl^- (Ma et al., 2014). Lorsque ce rapport est supérieur à 1, cet enrichissement en Na peut être dû à des échanges de bases avec des argiles ou à la dissolution de minéraux silicatés (Batayneh et al., 2008 ; Meyback, 1987). La salinité peut également avoir une origine marine, pour laquelle son rapport $\text{Na}/\text{Cl} = 0,86$ (Gning, 2015 ; Krimissa et al., 2004). Si ce rapport est supérieur à cette valeur, cette salinité pourrait provenir de saumures formées suite à l'évaporation de l'eau de mer (Kloppmann et al., 2011). Et lorsqu'on se retrouve avec un plus grand nombre de Na^+ par rapport au Cl, c'est à dire avec un rapport plus élevé que celui de la halite, cela peut être dû à des eaux usées (Jalali, 2007) .

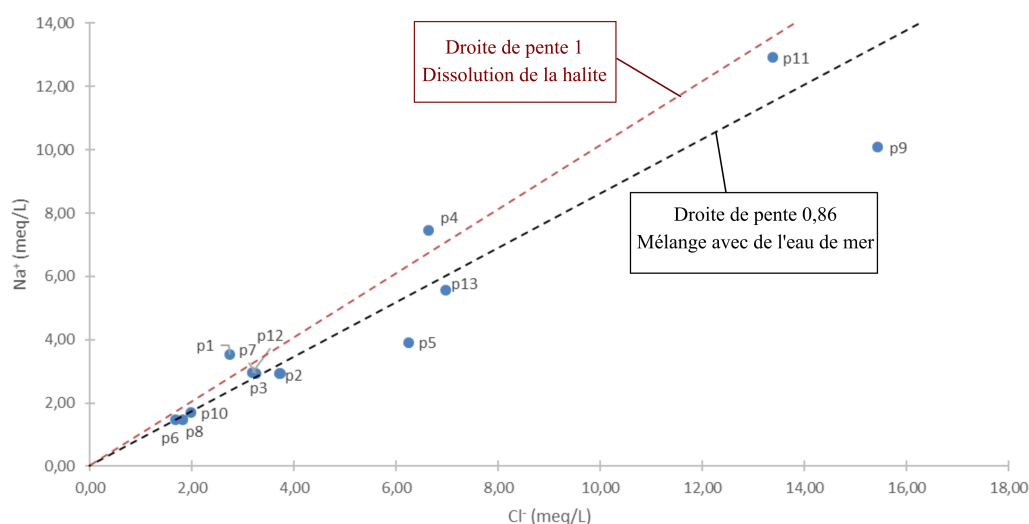


FIGURE 23 – Diagramme de Na^+ en fonction de Cl^- ; avec en rouge : la droite de dissolution de la halite ; en noir : droite de mélange avec de l'eau de mer.

Sur la figure 23, on observe la répartition des échantillons le long de la droite de dissolution de la halite et de l'eau de mer. Les échantillons p9 et p11 sont les plus minéralisés. Le point p7, p11 et p12 sont situés entre la ligne de dissolution de la halite et de l'eau de mer, pouvant indiquer que les ions proviennent d'un mélange des deux. Les points p1 et p4 se situent au-dessus de la ligne de dissolution de la halite, les ions provenant peut-être de la dissolution de minéraux silicatés ou suite à des échanges avec des argiles. Trois échantillons, p6, p8 et p10 se situent sur la ligne de dissolution de l'eau de mer qui doit certainement être l'origine des ions présents en solution, malgré les faibles concentrations. Toutes les valeurs présentes sont très loin d'avoir une composition proche de l'eau de mer. En effet, les concentrations maximales pour le Cl^- sont de 15,44meq/L et de 12,92meq/L pour le Na^+ . Suivant l'échantillon d'eau de mer prélevé au Sénégal, les valeurs sont respectivement de 455,15meq/L et 413,24meq/L (Gning, 2015).

B. Br^- et Cl^-

La seconde méthode est basée sur le rapport entre Br^- et Cl^- nous donnant également des indications sur l'origine de la salinité des eaux souterraines (Hsissou et al., 1999). L'ion bromure est une espèce mobile très bien conservée dans l'eau (El Achheb et al., 2001). Lorsque la nappe est en contact avec des eaux fraîches, le rapport Br^-/Cl^- est constant (Fetter et al., 1993).

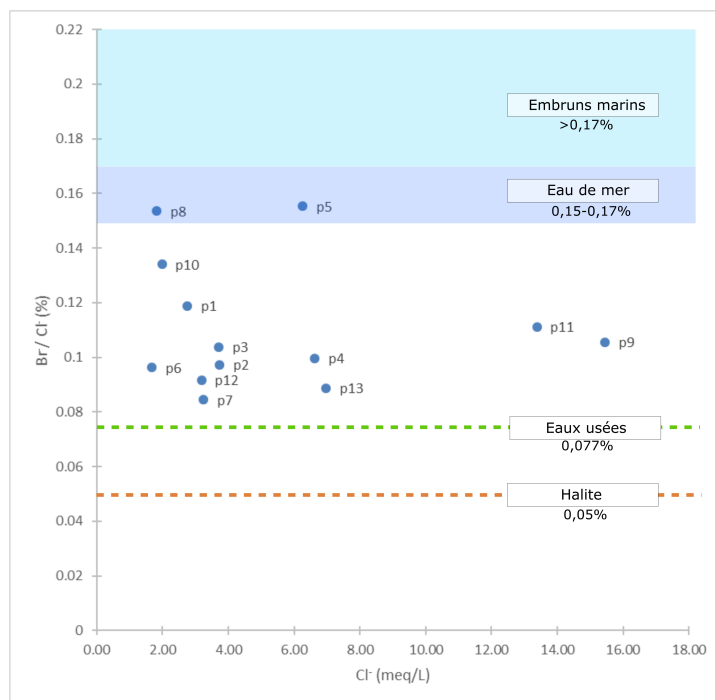


FIGURE 24 – Origine de la salinité représentée par le diagramme du rapport de Br^-/Cl^- en fonction de Cl^- , avec en orange, le rapport de dissolution de la halite à $0,05\%$ (Krimissa et al., 2004), en vert, le rapport correspondant à l'origine des eaux usées à $0,077\%$ (Hsissou et al., 1999); l'aire en bleu foncé est l'intervalle $0,15\%$ à $0,17\%$ où la minéralisation est issue de l'eau de mer (Morell et al., 1986) et en bleu clair, lorsque le rapport est supérieur à $0,17\%$, il correspond à l'apport d'aérosols ou d'embruns marins (Duce et al., 1976).

L'ensemble des échantillons ont été représentés dans la figure 24) diagramme de Br^-/Cl^- en fonction de Cl^- . Si le rapport de Br^-/Cl^- équivaut à $0,05\%$, les eaux sont issues de la dissolution de la halite représenté en orange (Krimissa et al., 2004) et lorsqu'il tourne autour de $0,077\%$, il s'agit davantage d'une contamination en eaux usées représenté en vert (Hsissou et al., 1999). Lorsque la minéralisation provient de l'eau de mer, le rapport se situe entre $0,15\%$ et $0,17\%$ selon Morell et al., 1986, et entre $0,13\%$ et $0,20\%$ selon Hsissou et al., 1999 représenté par une aire bleu foncée. Lorsqu'il s'agit d'embruns marins ou d'aérosols apportés par le vent, cette valeur sera supérieure à $0,17\%$ (Duce et al., 1976).

Dans la cas de la zone d'étude, l'origine de la salinité, pour la majorité des échantillons se trouvent entre des eaux usées et de l'eau de mer (entre $0,077\%$ et $0,15\%$) et deux échantillons, p5 et p8 sont localisés dans la zone d'origine d'eau marine (entre $0,15\%$ et $0,17\%$). Il n'y a pas d'origine de sel provenant de la halite.

4.4.3 Processus d'alcalinisation

Lors des processus d'irrigation en zone agricole, la qualité de l'eau déversée sur les cultures est d'une importance majeure pour la qualité des sols et le développement des plantes. La salinité, l'alcalinité et la dureté des eaux ont un impact direct l'eau, la végétation mais aussi sur la santé des populations (Lauchli André & Grattan Stephen R., 1990 ; Schoeller, 1960). Les diagrammes de Riverside et Wilcox nous indiquent la qualité des eaux par rapport à ces deux facteurs.

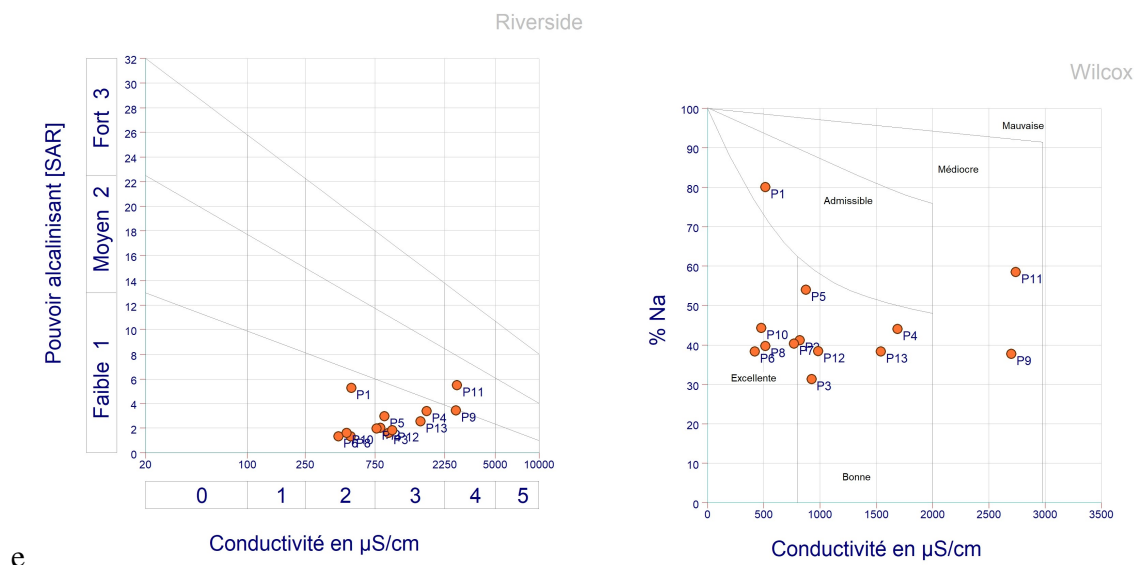


FIGURE 25 – Diagramme de Riverside (gauche) et diagramme de Wilcox (droite) pour les échantillons de la campagne de mars 2019.

Dans le diagramme de Riverside, la plupart des eaux se situent avec un faible pouvoir alcalinisant (SAR) et une conductivité électrique moyenne (groupes 2 et 3). Seuls les échantillons p9 et p11 se situent avec un pouvoir alcalinisant moyen et une conductivité électrique élevée (groupe 4). Lorsqu'on regarde le diagramme de Wilcox, on remarque que ces deux mêmes échantillons sont situés dans des eaux de qualité médiocre contrairement au reste des échantillons étant tous situés dans des eaux de qualité excellente, bonne et admissible. Les eaux des puits p9 et p11 présentent donc des eaux plus riches en Na, Cl (salinité) et en Mg et Ca (dureté).

4.4.4 Analyse des SOM's

Les SOM's peuvent être obtenus grâce à l'utilisation du programme Matlab (Ballabio & Vasighi, 2012; Kohonen, 2013). Deux analyses ont été réalisées. Une première afin de mettre en évidence des groupes liés à la salinité, et une seconde liée aux contaminations telles que l'impact de l'agriculture (fertilisants et engrais) ou d'autres pollutions liées au secteur minier ou domestique. Les processus d'oxydo-réduction sont également mis en évidence lors de cette analyse. Pour ces deux groupes, seuls les éléments majeurs et paramètres physico-chimiques ont été pris en compte. Cependant, les résultats pourraient être plus précis avec l'analyse des éléments traces et des isotopes (Haselbeck et al., 2019). Comme énoncé dans la section 3.3.4 (*Self-Organizing Maps*), les SOM's sont utilisés pour un jeu de données important (Kohonen, 2013 ; Kohonen et al., 2001 ; Haselbeck et al., 2019). Dans le cadre de ce travail, le nombre d'échantillons étant très faible (13), il faudra rester critique vis-à-vis des diffé-

rents groupes définis. Les matrice-U obtenues sont représentées dans les figures 26 et 27. L'ensemble des résultats de ces matrices ont été synthétisés dans les tables 3 et 4. Les groupes établis dans les U-matrices sont définies de manière arbitraire. Au vu du faible nombre d'échantillons, maximum 4 groupes ont été construits.

La première analyse permet de regrouper les échantillons en fonction de leur salinité. Les variables prises en compte sont le pH, la conductivité électrique, K^+ , Ca^{2+} , Li^+ , Mg^{2+} , Na^+ , Sr^{2+} , Br^- , Cl^- , F^- , HCO_3^- et SO_4^{2-} .

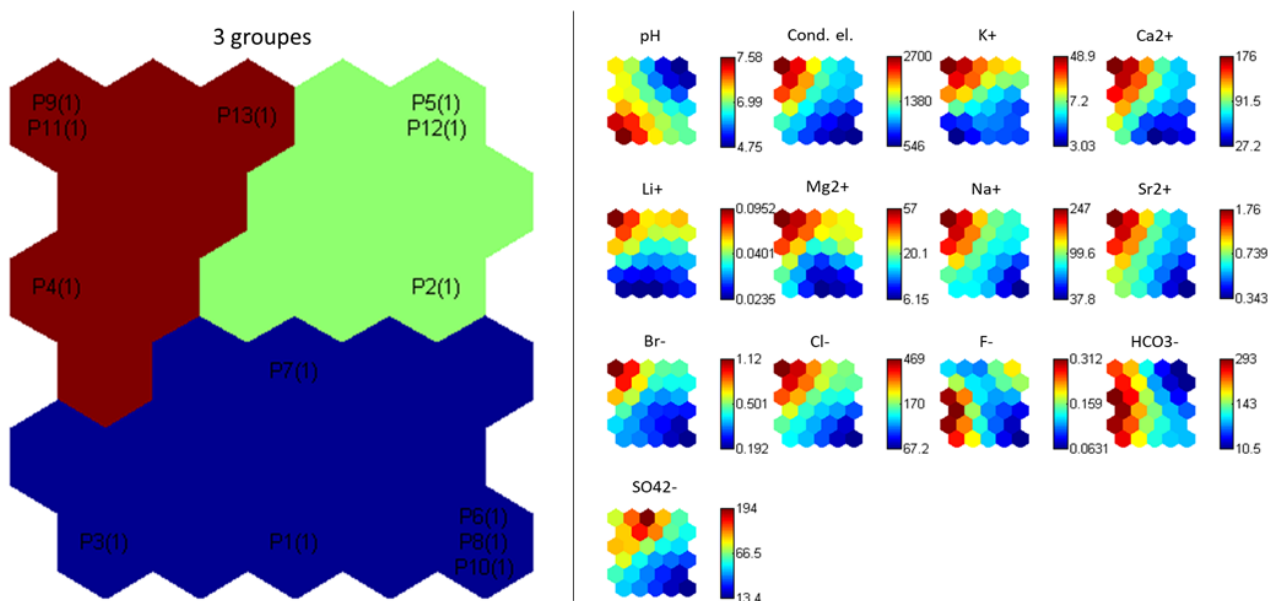


FIGURE 26 – Les SOM's en fonction de la salinité (gauche : U-Matrice subdivisée en 4 groupes ; droite : Répartition des paramètres des différents éléments appliqués par la méthode SOM's).

TABLE 3 – Résultats obtenus par la méthode des SOM's pour la salinité.

	pH	cond. el	K^+	Ca^{2+}	Li^+	Mg^{2+}	Na^+	Sr^{2+}	Br^-	Cl^-	F^-	HCO_3^-	SO_4^{2-}
Groupe 1	+-	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Groupe 2	--	-	+/-	-	+	+	-	-	-	-	-	--	-
Groupe 3	+	++	++	++	++	++	++	++	++	++	-	++	+

Dans la table 3, on peut observer les tendances générales des différents groupes établis. L'ensemble des variables semblent être corrélées, sauf le pH et HCO_3^- qui ont une tendance opposée.

Le groupe 1 est composé de 6 échantillons p1, p3, p7, p6, p8, p10. L'ensemble des variables sont faibles et peu minéralisées. Il n'y a pas de lien géographique visible et les échantillons ne semblent pas avoir de similarités évidentes. Le groupe 2 regroupe les puits p2, p5, p12. Ils semblent avoir un enrichissement relatif en lithium et magnésium, mais reste en proportions faibles comparé au groupe 3. Les valeurs de pH et les concentrations en HCO_3^- sont très faibles. Il n'y a pas de lien géographique visible. Le groupe 3 possède une grande minéralisation, tous les paramètres semblent être

supérieurs aux deux autres groupes. Il inclut les échantillons p4, p9, p11 et p13. Les puits p11 et p13 sont localisés le long de la côte tandis que p4 et p9 sont plus reculés dans les terres.

Cette deuxième analyse va tenter de déterminer différents groupes en fonction de leurs contaminations ainsi que d'observer les divers processus d'oxydo-réduction présents dans les eaux souterraines analysées. Les paramètres étudiés sont le potentiel hydrogène (pH), les réactions d'oxydation-réduction (Eh), l'oxygène dissous, l'ion potassium (K^+), l'ammonium (NH_4^+), le fer dissous (Fe), le nitrate (NO_3^-), le phosphate (PO_4^{3-}) et le sulfate (SO_4^{2-}).

Suite à l'analyse des SOM's des différentes variables (figure 27) et les résultats de ceux-ci pour chacun des groupes (table 4), différentes relations peuvent être mises en avant, telles que la corrélation positive entre PO_4^{2-} , SO_4^{2-} , NO_3^- et K^+ , mais aussi celle du NH_4^+ et du fer. La corrélation négative entre le pH et le Eh sont mis en évidence, ainsi que la corrélation positive entre Eh et l'oxygène dissous.

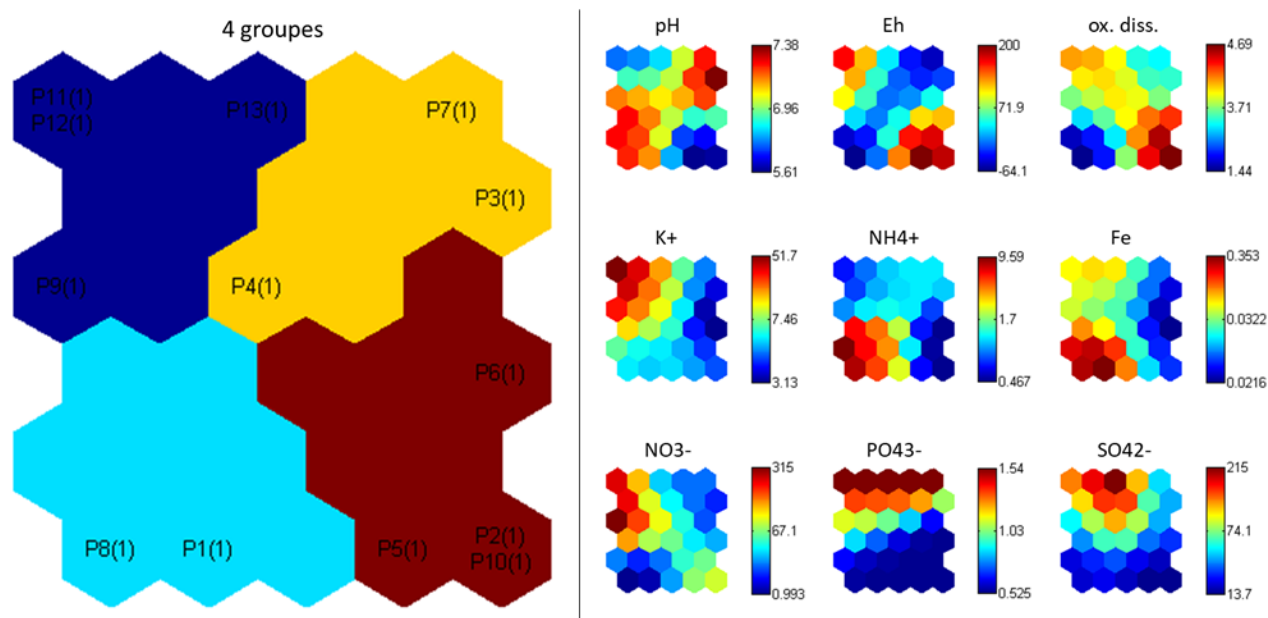


FIGURE 27 – Les SOM's en fonction des contaminations (a = U-Matrice subdivisée en 4 groupes ; b = Répartition des paramètres des différents éléments appliqués par la méthode SOM's).

TABLE 4 – Résultats obtenus par la méthode des SOM's pour contaminations et processus d'oxydo-réduction.

	pH	Eh	ox. diss.	K^+	NH_4^+	Fe	NO_3^-	PO_4^{3-}	SO_4^{2-}
Groupe 1	-	+	+	++	--	+	++	++	++
Groupe 2	++	--	--	-	++	++	--	--	--
Groupe 3	++	--	-	-	-	-	--	+	+/-
Groupe 4	--	++	++	--	--	--	-	--	--

Le premier groupe regroupe les puits p9, p11, p12 et p13. Il présente les concentrations en nitrate, phosphate, sulfate et potassium les plus élevées. Ces 4 échantillons sont localisés dans la zone littorale, où les activités maraichères sont fortement présentes. Le groupe 2 contient les puits p1 et p8. Ils semblent être liés principalement par la présence d'ammonium et de fer, associé à l'absence de nitrate. Il s'agit d'un milieu très réducteur. Les deux échantillons sont géographiquement proches l'un de l'autre, localisés entre les industries ICS et la côte Atlantique. Le groupe 3 est composé des puits p3, p4 et p7. Ceux-ci sont faiblement impactés par variables présentées ci-dessus. Les puits p3 et p4 sont localisés au sud de la zone des ICS et dans les terres, tandis que p7 est localisé en amont des ICS bien plus dans le continent, tous étant éloignés des zones maraichères. Le dernier groupe, le groupe 4, réunit les échantillons p2, p5, p6 et p10. Seul p2 est localisé dans une zone cultivable et relativement proche de la côte. Les puits p5 et p10 sont localisés le long de la nationale N2 à l'est, dans la partie la plus continentale de la zone d'étude, en amont des industries ICS.

Afin de visualiser les résultats dans le contexte hydrogéologique à grande échelle, la répartition des différents groupes est affichée spatialement dans l'annexe 23. Les diagrammes de Piper ont été réalisés avec les différents groupes formés (annexes 20 et 21). On remarque que pour la salinité les échantillons du groupe 3 ont les plus grandes concentrations en Cl^- . On remarque également que ceux-ci présentent les qualités les moins bonnes pour l'irrigation (annexe 24). Pour les groupes liés aux contaminations, le diagramme de Piper permet de différencier les groupes 1 et 2 par rapport à leurs concentrations en $\text{SO}_4 + \text{Cl} + \text{NO}_3$.

5 Discussion

La technique de réseau de neurone artificiel des SOM's, combinée à une approche hydrochimique et hydrodynamique a été appliquée dans ce travail afin de caractériser la nappe d'eau des communes de Darou Khoudoss, Taiba Ndiaye et Méouane au Sénégal. L'analyse des SOM's a permis d'attribuer différents groupes d'eaux souterraines en fonction de caractéristiques communes. Comme énoncé dans la section 3.3.4, Haselbeck et al., 2019 utilise cette méthode de statistiques multivariées afin de décrire l'origine de la salinité dans une nappe d'eau souterraine en Allemagne, et a obtenu des résultats significatifs. Dans le cas de cette étude-ci, des phénomènes communs ont été mis en évidence pour les différents ensembles, mais d'autres semblent s'être formés par défaut. Le nombre d'échantillon est cependant trop faible que pour permettre de réellement affirmer les liens communs entre tous les membres regroupés.

L'analyse hydrodynamique a permis de déterminer le sens d'écoulement des eaux allant de l'est vers l'ouest en suivant le niveau topographique de la région. Un dôme piézométrique est observé au niveau de la commune de Taiba Ndiaye avec une altitude maximale de 39,75m, correspondant aux résultats obtenus par DGPRES, 2014. Un rabattement local de la nappe est observé au niveau de la mine de phosphate des ICS, probablement dû à un pompage intensif.

Le diagramme de Piper a permis de déterminer le faciès chloruré, calcique, sodique et potassique des eaux, étant typique des environnements côtiers (Najib et al., 2017).

Suite à l'analyse des indices de saturation, obtenus par le module PHREEQC, la réalisation d'un graphe de l'indice de saturation de la calcite (ISC) sur l'indice de saturation de la dolomite (ISD) a permis de déterminer que les eaux des puits p1, p2, p5 et p12 sont moins minéralisées, avec une vitesse de circulation plus élevée et avec un temps de séjour dans la nappe plus court que le reste des échantillons prélevés dans la zone.

La présence d'échanges ioniques de base a pu être illustrée par le diagramme de $[(Ca^{2+}+Mg^{2+})-(SO_4^{2-}+HCO_3^-)]$ en fonction de $[(Na^++K^+)-(Cl^-+NO_3^-)]$. L'ensemble des échantillons (sauf p1), montre une libération du Ca^{2+} suite à la fixation du Na^+ provenant de l'eau de mer. Ceci démontre un phénomène d'intrusion marine présent dans cette zone côtière. Cependant, les concentrations des éléments sont encore très faible par rapport à la composition de l'eau de mer prélevée par Gning, 2015, indiquant une faible degré d'avancement.

L'origine de la salinité a pu être démontrée par deux analyses distinctes. Par le diagramme binaire de Na^+/Cl^- , la plupart des échantillons semblent se rapprocher de la droite de dissolution de l'eau de mer (p2, p3, p5, p6, p7 p8, p10, p12 et p13). Deux échantillons (p1, p4) proviendraient de la dissolution de minéraux silicatés ou suite à des échanges avec des argiles. Les deux eaux les plus minéralisées sont p9 et p11, ce premier ayant plus de Cl^- que de Na^+ . Le diagramme de Br^-/Cl^- , lui, nous indique que la salinité de l'ensemble des échantillons provient d'un mélange entre des eaux usées et d'eaux marines. Seuls les échantillons p5 et p8 semblent d'avantages impactés par des apports marins que les eaux usées. La salinité ne provient pas de la dissolution de la halite.

Des processus de dénitrification ont été identifiés grâce au graphe de $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$. Les teneurs en nitrate dans les eaux semblent provenir de l'activité anthropique locale. Les processus d'alcalinisation, via les diagrammes de Riverside et Wilcox, ont permis de déterminer la qualité des eaux pour l'irrigation des cultures agricoles. L'ensemble des eaux sont de qualité excellente à admissible. Seuls les puits p9 et p11, étant plus minéralisés, sont de qualités médiocres pour l'irrigation des surfaces agricoles pouvant provoquer l'alcalinisation des sols.

L'analyse multivariée des *Self-Organizing Maps* a permis de classer les échantillons en différents groupes de caractéristiques similaires. Les ensembles établis en fonction de la salinité (figure 26) ont permis de regrouper les puits p4, p9, p11 et p13. Les eaux semblent être les plus minéralisées, correspondant avec les résultats obtenus avec les diagrammes de Stiff (figure 18) et le diagramme Na^+/Cl^- (figure 23). Les puits p4 et p9 sont localisés plus dans les terres, tandis que p11 et p13 se trouvent sur la côte. La figure 28, permet de comprendre la minéralisation élevée des puits p4 et p9 malgré leur recul par rapport à l'océan. En fonction de la profondeur de la nappe, l'eau échantillonnée peut provenir de la zone d'eau douce ou plutôt de la zone d'eau mixte saumâtre, ce qui pourrait être le cas de ces 4 échantillons. De plus, le pompage intensif de la mine des ICS provoque le rabattement important de la surface piézométrique sous l'effet des exhaures. Ce cône de rabattement va être associé à la remontée de l'interface eau douce-eau salée, par rééquilibrage hydrostatique (Le Gourieres, 1985). Les puits des autres groupes ne semblent pas atteints par ces phénomènes.

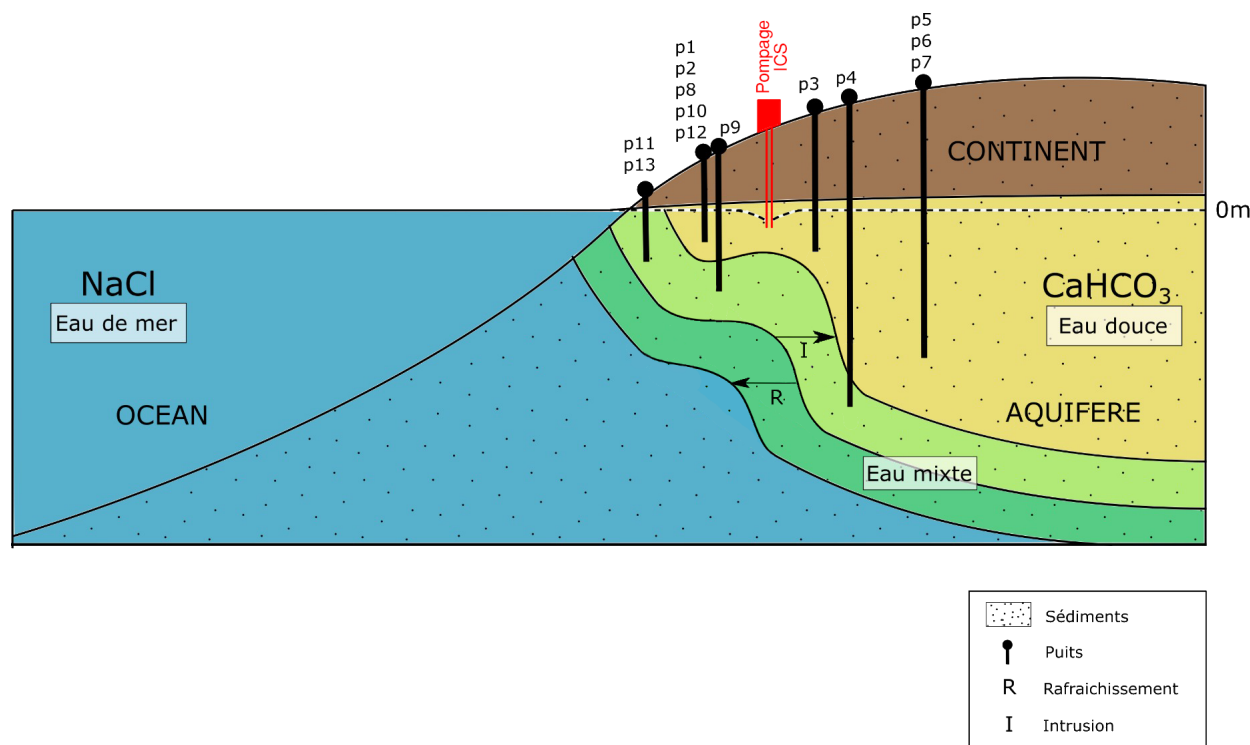


FIGURE 28 – Localisation des puits en 3 dimension, afin de représenter les différences de minéralisation entre les puits.

Les groupes de SOM's réalisés afin de mettre en évidence des contaminations (figure 27). Le premier groupe avec les puits p9, p11, p12 et p13 regroupe les eaux souterraines les plus minéralisées en NO_3^- , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} et K^+ . Ces échantillons étant localisés sur la bande agricole de la zone des Niayes le long de la côte, pourraient avoir été contaminées par les fertilisants déversés sur les cultures agricoles en surface.

Les puits p1 et p8, formant le second groupe, semblent être liés par des concentrations plus élevées en NH_4^+ et Fe associé à l'absence de NO_3^- et les très faibles concentrations en PO_4^{3-} , SO_4^{2-} et K^+ . Ces deux échantillons localisés en aval de la mine de phosphate des ICS (figure 13) pourrait avoir été contaminés par celle-ci. Cependant, p9 aurait également été touché. Les puits p1 et p8 présentent des conditions très réductrices, pouvant expliquer leur minéralisation particulière. Le puits p8, localisé dans le village de Darou Mboye est abandonné. De l'eau stagnante, de l'accumulation de matière organique ou la présence de couches argileuses augmentant la perméabilité pourraient faire du lui un cas isolé, lui conférant des caractéristiques particulières. Le puits p1 étant toujours utilisé pour l'agriculture, présente les mêmes caractéristiques réductrices, mais de manière moins accentuée suite au renouvellement des eaux. Les groupes 3 et 4 ont des minéralisations très faibles pour l'ensemble des variables. Les puits sont tous localisés en dehors des zones maraichères et de la zone d'influence de la mine de phosphate. Ils ne semblent donc pas avoir été impactés par des contaminations majeures.

Pour déterminer si cette théorie est correcte, il faudrait connaître la profondeur de la nappe afin de savoir à quel niveau l'eau a été prélevée. Une intrusion marine a été confirmée dans ce travail avec l'échange de bases ioniques (figure 22). Si cette intrusion est avancée, il se pourrait que certains puits, anciennement influencés par des eaux douces, se retrouvent à présent influencés par une eaux mixte, suite à la remontée de l'interface eau douce-eau salée causée par le rabattement de la nappe, augmentant fortement la minéralisation des puits touchés. Ces différences de minéralisation sont visuellement représentées avec les diagrammes de Stiff (figure 18).

Il reste des incertitudes quant à l'interprétation des résultats. Une visualisation en 3 dimensions pourrait permettre de déterminer la nature de l'aquifère et ainsi expliquer les caractères disparates des eaux souterraines prélevées. Un nombre plus élevé d'échantillons aurait pu permettre une meilleure représentativité et ainsi éventuellement relever des caractéristiques communes. La base de données de la DGPRE aurait pu apporter de nombreuses informations sur l'évolution de la nappe d'eau souterraine au cours du temps. Cependant, tous les résultats ne semblaient pas cohérents et n'ont donc pas été pris en compte dans cette étude, mis à part pour le niveau piézométrique de la campagne de décembre 2018.

6 Conclusion et perspectives

Au Sénégal, 80% des activités agricoles sont concentrées dans la zone des Niayes, le long de la Grande Côte sénégalaise. L'absence de cours d'eau pérenne fait de la nappe souterraine la principale source en eau pour l'irrigation de ces cultures. Les enjeux quant à la gestion et à la qualité de cette nappe sont nombreux. L'objectif de ce travail est de caractériser cette nappe au niveau des communes de Darou Khoudoss, Taiba Ndiaye et Méouane dans la région de Thiès dans l'objectif d'apporter des informations complémentaires à celles récoltées par la DGPPE, afin d'améliorer les connaissances et d'en améliorer la gestion. Une étude piézométrique et des recherches hydrochimiques classiques combinées à l'analyse de statistiques multivariées ont été appliquées.

La campagne de terrain, réalisée en mars-avril 2019, a permis l'étude de 13 puits et également de découvrir le mode de vie local et les enjeux par rapport à la gestion des ressources en eaux. Les échantillons prélevés ont été envoyés en laboratoire à l'Université de Liège pour les analyses de potentiométrie, de chromatographie ionique et de spectrométrie d'absorption atomique.

Les relevés piézométriques ont permis de déterminer le sens d'écoulement des eaux de l'est en ouest, suivant la topographie. Un cône de rabattement suite au pompage intensif de la mine de phosphate localisée au centre de la zone d'étude ainsi qu'un dôme piézométrique d'une altitude de 39,75m dans la commune de Taiba Ndiaye ont été observés.

La caractérisation hydrochimique, réalisée par méthode classique a permis de déterminer le faciès chloruré, calcique, sodique et potassique. Les échanges de bases présents en solution sont caractéristiques d'un phénomène d'intrusion saline. La salinité semble belle et bien avoir une origine marine, mais également un apport en sel via les eaux usées, provenant des activités anthropiques domestiques et industrielles. Cependant, seuls les échantillons p9 et p11 sont de qualités médiocres pour l'irrigation des cultures, et ce, suite à une alcalinisation et une conductivité électrique trop élevée.

Grâce à l'analyse statistique des SOM's, différents ensembles sont ressortis. Les 4 échantillons p4, p9, p11 et p13 présentent une minéralisation bien supérieure que le reste des eaux de la zone, probablement dû à l'avancée de l'interface eau douce-eau salée. Celle-ci, provoquée par le pompage intensif des ICS, provoquant le rabattement de la nappe entraînant la remontée de l'interface, par rééquilibrage hydrostatique. La minéralisation particulière du puits p1 et p8 peut-être expliquée par une isolation par rapport à la nappe d'eau souterraine, suite à la présence de couche argileuses imperméables et l'accumulation de matière organique dans un endroit confiné rendant le milieu très réducteur. Les puits p9, p11, p12 et p13 sont les plus impactés par l'activité maraîchère, suite à l'utilisation d'engrais dans toute cette zone côtière. Globalement, l'ensemble des puits localisés dans la zone agricole (p1, p2, p8, p9, p10, p11, p12, p13) sont impactés par les nitrates, phosphates ou encore par les sulfates.

Certaines données n'ont pas pu être récupérées lors de la campagne de terrain de mars-avril 2019 pour des raisons budgétaires. Plusieurs perspectives d'investigations supplémentaires peuvent être envisagées. Pour commencer, la combinaison des données entre les nouveaux puits choisis lors de cette

étude avec les forages et piézomètres de la DGPRE pourrait permettre d'avoir un suivi plus représentatif et plus complet de la zone des Niayes. L'étude de la base de données de la DGPRE au cours des dernières années pourrait permettre la modélisation de l'évolution hydrochimique et hydrodynamique de la nappe d'eau souterraine. Enfin, la troisième dimension de la zone d'étude est manquante. L'étude du terrain au travers de méthodes géophysiques, telle que la tomographie de résistivité électrique, pourrait améliorer de manière significative la caractérisation de l'avancée du biseau salin en profondeur. Ces investigations pourraient être réalisées perpendiculairement à la côte, entre Mboro-Plage (p13), et Andal 1 (p9) afin de comprendre plus précisément la minéralisation élevée des puits p4 et p9. Des mesures de profondeur de nappe souterraine des différents ouvrages pourrait peut-être permettre de déterminer la nature de l'aquifère et expliquer certains caractères chimiques inexpliqués.

Les analyses et discussions réalisées tout au long de ce mémoire visent à dresser les bases à de futures études plus approfondie de l'hydrogéologie afin d'assurer la pérennité des eaux souterraines de la région de Mboro pour les années à venir.

7 Bibliographie

- Abid K., Zouari K., Dulinski M., Chkir N. & Abidi B. mar. 2011. Hydrologic and Geologic Factors Controlling Groundwater Geochemistry in the Turonian Aquifer (Southern Tunisia). en. *Hydrogeology Journal* Vol. 19.No. 2, 415-427. <http://dx.doi.org/10.1007/s10040-010-0668-z>.
- Allaire J. 2012. RStudio : Integrated Development Environment for R. *Boston, MA* Vol. 770.
- Amin I. E. 2001. Applied Hydrogeology (4th Ed.) by C.W. Fetter. English. *Ground Water* Vol. 39.No. 4, 484.
- ANAT - Agence Nationale Pour l'Aménagement Du Territoire p. d.
http://www.anat.sn/nos_realisations.php.
- Appelo C. A. J. 2005. Geochemistry, Groundwater and Pollution. Anglais. Sous la dir. de Postma D. 2ème édition. Boca Raton : Boca Raton : CRC Press, 2005.
- Astel A., Mazerski J., Polkowska Ż. & Namieśnik J. mar. 2004. Application of PCA and Time Series Analysis in Studies of Precipitation in Tricity (Poland). *Advances in Environmental Research* Vol. 8.No. 3, 337-349. [http://dx.doi.org/10.1016/S1093-0191\(02\)00107-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1093-0191(02)00107-7).
- Audibert M. 1970. Delta Du Fleuve Sénégal. *Étude hydrogéologique. Projet hydro-agricole du bassin du fleuve Sénégal* Vol. 3, 54.
- Ayral P.-A. & Sauvagnargues-Lesage S. 2009. Systèmes d'Information Géographique : outil d'aide à la gestion territoriale. fr. *Techniques de l'ingénieur Géomatique* base documentaire : TIB641DUO.ref. article : h7415.
- Ballabio D. & Vasighi M. 2012. A MATLAB Toolbox for Self Organizing Maps and Supervised Neural Network Learning Strategies. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* Vol. 118, 24-32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemolab.2012.07.005>.
- Batayneh A. T., Al-Momani I. F., Jaradat R. A., Awawdeh M. M., Rawashdeh A. M. M. & Ta'any R. A. 2008. Wheatering Processes Effects on the Chemistry of the Main Springs of the Yarmouk Basin, North Jordan. en. *Journal of Environmental Hydrology* Vol. 16, 11.
- Baye J. 1976. *Etude hydrogeologique de la zone des Niayes - Ressources en eau*. fr. Rapp. tech. 1976, 18.
- Bellion Y. J. C. 1987. Histoire Géodynamique Post-Paléozoïque de l'Afrique de l'Ouest, d'après l'étude de Quelques Bassins Sédimentaires (Sénégal, Taoudenni, Iullemmeden, Tchad). Thèse de doct. Université d'Avignon et des pays de Vaucluse, 1987.
- Bertrand J. M., Bertrand-Sarfati J. & Bessoles B. oct. 2013. Afrique de l'Ouest : Introduction Géologique et Termes Stratigraphiques. fr. Elsevier, oct. 2013.
- Bradaï A. & Douaoui A. 2013. Evolution géochimique de la solution des sols irrigués par les eaux à alcalinité résiduelle positive en conditions contrôlées. Application au Bas-Chéliff. French. *Nature & Technology* No. 8, 27B, 28B, 29B, 30B, 31B, 32B.
- Brouyère S. 2017. Qualité et Protection des Eaux Souterraines. fr. 2017.

- Caude M. & Jardy A. 1996. Méthodes chromatographiques - Introduction. fr. *Techniques de l'ingénieur - Chromatographie et techniques séparatives* Base documentaire : TIB385DUO.ref. article : p1445.
- Caudron E. & Padreau D. 2010. Chromatographie ionique minérale - Méthodes de détection. fr. *Techniques de l'ingénieur - Chromatographie et techniques séparatives* Base documentaire : TIB385DUO.ref. article : p1451.
- Charlot G. 1946. Chapitre III : Groupe de l'ammoniaque. fr. *Théorie et méthode nouvelle d'analyse qualitative*. Deuxième édition entièrement refondue. Paris : Maison et Cie éditeurs, Libraires de l'Académie de médecine, 1946.
- Choi B.-Y., Yun S.-T., Kim K.-H., Kim J.-W., Kim H. M. & Koh Y.-K. fév. 2014. Hydrogeochemical Interpretation of South Korean Groundwater Monitoring Data Using Self-Organizing Maps. *Journal of Geochemical Exploration* Vol. 137, 73-84.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.12.001>.
- Crevola G., Cantagrel J.-M. & Moreau C. sept. 1994. Le Volcanisme Cénozoïque de La Presqu'île Du Cap-Vert (Sénégal) ; Cadre Chronologique et Géodynamique. en. *Bulletin de la Société Géologique de France* Vol. 165.No. 5, 437-446.
- CSE 2006. *Etude de La Dynamique Des Unités d'occupation - Utilisation Des Sols Dans La Zone d'intervention Du Projet d'Appui à l'Entrepreneuriat Paysan (PAEP)*. Rapport de Recherches. 2006, 1-2.
- CTB & Université de Liège mai 2015. Formation en Gestion intégrée des Ressources en Eau (GIRE) - Notion sur les ressources en eau. fr. Formation. Kaolack, mai 2015.
- Dedjell Y. 2015. Hydrogéochimie des eaux de la nappe du Continental intercalcaire au Nord de la dorsale du Mzab, Sahara Septentrional Algérien. fr. *Mémoire de fin d'étude, Université de Liège*, 44.
- DGPRES 2014. *Etude du Plan de Gestion des Ressources en Eau de la Sous UGP Niayes*. Français. Rapport provisoire. 2014, 80.
- DGPRES & PEPAM 2014. Elaboration d'un guide méthodologique pour la planification des ressources en eau dans une sous-unité de gestion et de planification (UGP) - Note introductive. fr. *Tome 2 – Appui à l'exécution nationale : volet Eau et Assainissement*. 2014, 50.
- Diallo M. D., Ndiaye O., Saleh M. M., Tine A., Diop A. & Guisse A. 2015. Etude comparative de la salinité de l'eau et des sols dans la zone Nord des Niayes (Sénégal). fr. *African Crop Science Journal* Vol. 23.No. 2, 101-111.
- Diallo S., Nacro H. B. & N'diaye A. 2017. Efficacité Des Stratégies Endogènes d'adaptation Du Secteur Agricole Aux Changements Climatiques Dans Le Bassin de La Région de Thiès (Sénégal). *International Journal of Biological and Chemical Sciences* Vol. 11.No. 2, 707-721-721. <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v11i2.14>.

- Dixon W. & Chiswell B. juil. 1992. The Use of Hydrochemical Sections to Identify Recharge Areas and Saline Intrusions in Alluvial Aquifers, Southeast Queensland, Australia. *Journal of Hydrology* Vol. 135.No. 1, 259-274. [http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694\(92\)90091-9](http://dx.doi.org/10.1016/0022-1694(92)90091-9).
- Drever J. I. 1997. The Geochemistry of Natural Waters : Surface and Groundwater Environments. Anglais. 3rd ed. T. 437. Upper Saddle River, N.J. : Prentice Hall, 1997.
- Droubi A., Fritz B. & Tardy Y. 1976. Equilibres entre minéraux et solutions. Programmes de calcul appliqués à la prédiction de la salure des sols et des doses optimales d'irrigation. fre. *Cahiers ORSTROM, série pédologie* Vol. 14, 13-38.
- Dryade J. 1990. *Inventaire Biophysique de La Région Des Niayes : Synthèse. Rapport Projet Conservation Des Terroirs Du Littoral*. Technical Report. 1990.
- Duce R. A. et al. 1976. Trace Metals in the Marine Atmosphere : Sources and Fluxes. *Marine pollutant transfer*, 77-119.
- Durand G. 2010. Potentiométrie - Définitions et principes généraux. fr. *Techniques de l'ingénieur - Méthodes électrochimiques* Base documentaire : TIB388DUO.ref. article : p2115.
- Ebong E. D., Akpan A. E., Emeka C. N. & Urang J. G. 2017. Groundwater Quality Assessment Using Geoelectrical and Geochemical Approaches : Case Study of Abi Area, Southeastern Nigeria. English. *Applied Water Science* Vol. 7.No. 5, 2463-2478. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1007/s13201-016-0439-7>.
- Edmunds W. M., Guendouz A. H., Mamou A., Moulla A., Shand P. & Zouari K. juin 2003. Groundwater Evolution in the Continental Intercalaire Aquifer of Southern Algeria and Tunisia : Trace Element and Isotopic Indicators. *Applied Geochemistry* 18.No. 6, 805-822. [http://dx.doi.org/10.1016/S0883-2927\(02\)00189-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0883-2927(02)00189-0).
- El Achheb A., Mania J., Mudry J. & Chauve P. 2001. Processus de Salinisation Des Eaux Souterraines Dans Le Bassin Sahel-Doukkala (Maroc Occidental). *First International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers-Monitoring, Modeling and Management, Essaouira, Morocco*. 2001.
- Fall A. S., Fall S. T., Cisse I., Badiane A. N., Diao M. B. & Fall C. A. 2001. Caractérisation de La Zone Des Niayes. *CRDI*. 7p.
- Fall M. 1986. Environnements sédimentaires quaternaires et actuels des tourbières des Niayes de la Grande Côte du Sénégal. fr. Thèse de doct. Dakar : Université de Dakar, 1986.
- Fall S. T., Fall A. S., Cissé I., Badiane A., Fall C. A. & Diao M. B. 2000. Intégration Horticulture-élevage Dans Les Systèmes Agricoles Urbains de La Zone Des Niayes (Sénégal). *Bulletin de l'APAD* No. 19.
- Fetter C. W., Boving T. & Kreamer D. 1993. Contaminant Hydrogeology. New York : Macmillan Publishing Co., 1993.

- Florent E. O., Aïssatou G.-S. S., Timothée M., Laurent M. & Serigne F. p. d. Mécanismes De Contamination Des Eaux Souterraines Dans Le Secteur Du Lac Mbeubeuss, Dakar, Senegal. en. *European Scientific Journal, ESJ* Vol. 14.No. 27, 254.
- Gamble A. & Babbar-Sebens M. 2012. On the Use of Multivariate Statistical Methods for Combining In-Stream Monitoring Data and Spatial Analysis to Characterize Water Quality Conditions in the White River Basin, Indiana, USA. en. *Environmental Monitoring and Assessment* Vol. 184.No. 2, 845-875. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-011-2005-y>.
- Gerritse R. G. & George R. J. 1988. The Role of Soil Organic Matter in the Geochemical Cycling of Chloride and Bromide. *Journal of Hydrology* Vol. 101.No. 1-4, 83-95.
- Gning A. A. mar. 2015. Etude et Modélisation Hydrogéologique des Interactions Eaux de Surface-Eaux Souterraines dans un Contexte d'Agriculture Irriguée dans le Delta du Fleuve Sénégal. fr. Thèse de doct. Université de Liège, mar. 2015.
- Hall M. J. & Minns A. W. oct. 1999. The Classification of Hydrologically Homogeneous Regions. *Hydrological Sciences Journal* Vol. 44.No. 5, 693-704. <http://dx.doi.org/10.1080/02626669909492268>.
- Haselbeck V., Kordilla J., Krause F. & Sauter M. sept. 2019. Self-Organizing Maps for the Identification of Groundwater Salinity Sources Based on Hydrochemical Data. *Journal of Hydrology* Vol. 576, 610-619. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.06.053>.
- Hsissou Y., Mudry J., Mania J., Bouchaou L. & Chauve P. mar. 1999. Utilisation Du Rapport Br/Cl Pour Déterminer l'origine de La Salinité Des Eaux Souterraines : Exemple de La Plaine Du Souss (Maroc). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science* Vol. 328.No. 6, 381-386. [http://dx.doi.org/10.1016/S1251-8050\(99\)80103-7](http://dx.doi.org/10.1016/S1251-8050(99)80103-7).
- Idder A., Idder T., Serraye A., Negais H. & Kemassi H. p. d. Analyse géochimique des eaux d'un aquifère superficiel en région aride (Cas de l'oasis de Ouargla : Sahara algérien). fr, 6.
- Jalali M. 2007. Hydrochemical Identification of Groundwater Resources and Their Changes under the Impacts of Human Activity in the Chah Basin in Western Iran. *Environmental Monitoring and Assessment* Vol. 130.No. 1, 347-364.
- Jones G. D., Whitaker F. F., Smart P. L. & Sanford W. E. 1997. Dolomitization of Carbonate Platforms by Saline Groundwater : Coupled Numerical Modelling of Thermal and Reflux Circulation Mechanisms. *Proceedings of Geofluids II Conference, Chippenham, United Kingdom, Antony Rowe Ltd.* 1997, 378-381.
- Kamagaté B., Séguis L., Favreau G., Seidel J.-L., Descloitres M. & Affaton P. mai 2007. Processus et Bilan Des Flux Hydriques d'un Bassin Versant de Milieu Tropical de Socle Au Bénin (Donga, Haut Ouémé). *Comptes Rendus Geoscience* Vol. 339.No. 6, 418-429. <http://dx.doi.org/10.1016/j.crte.2007.04.003>.
- Karanth K. R. 1987. Ground Water Assessment : Development and Management. New Delhi : Tata McGraw-Hill Education, 1987.

- Khouma M., Ndiaye R., Cissé I., Fall S. T., Diom F., Ndiaye N. S. F. & Thomas I. 2004. Les Sols Des Niayes : Caractérisation, Évolution En Fonction Des Changements Hydro-Climatiques. *Research Note (Unpubl.)* 1-37.
- Kloppmann W., Bourhane A. & Asfirane F. 2011. Méthodologie de Diagnostic de l'origine de La Salinité Des Masses d'eau. *Emploi des outils géochimiques, isotopiques et géophysiques : BRGM*.
- Kohonen T. jan. 2013. Essentials of the Self-Organizing Map. *Neural Networks*. Twenty-Fifth Anniversay Commemorative Issue Vol. 37, 52-65.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.neunet.2012.09.018>.
- Kohonen T., Schroeder M. R. & Huang T. S. 2001. Self-Organizing Maps, Third Ed. *Springer-Verlag New York Inc., Secaucus, NJ, USA* Vol. 43.No. 2.
- Krimissa S., Michelot J.-L., Bouchaou L., Mudry J. & Hsissou Y. nov. 2004. Sur l'origine Par Altération Du Substratum Schisteux de La Minéralisation Chlorurée Des Eaux d'une Nappe Côtière Sous Climat Semi-Aride (Chtouka-Massa, Maroc). *Comptes Rendus Geoscience* Vol. 336.No. 15, 1363-1369. <http://dx.doi.org/10.1016/j.crte.2004.08.003>.
- Le Gourieres D. 1985. Exploitation des nappes d'eau douce flottant sur des eaux saées par forages et puits circulaires ; rabattements theoriques et debits maximaux a ne pas dépasser pour éviter la salinisation ; profondeur optimale a donner aux forages. fr. *IAHS-AISH Publication*. T. Vol. 146. Louvain : International Association of Hydrological Sciences, 1985, 145-158.
- Leisen M., Boiron M.-C., Richard A. & Dubessy J. nov. 2012. Determination of Cl and Br Concentrations in Individual Fluid Inclusions by Combining Microthermometry and LA-ICPMS Analysis : Implications for the Origin of Salinity in Crustal Fluids. *Chemical Geology* Vol. 330-331, 197-206. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.09.003>.
- Lejeune P. & Hellemans P. 2000. Effet du couvert forestier sur la précision d'un système de positionnement global différentiel (dGPS). fr. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement* Vol. 4.No. 1.
- López Garcíá H. & Machón González I. avr. 2004. Self-Organizing Map and Clustering for Wastewater Treatment Monitoring. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* Vol. 17.No. 3, 215-225. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2004.03.004>.
- Louvrier M. M. 1971. Etude hydrochimique de quelques eaux minérales Françaises : Applications des méthodes de traitement automatique. fr. *Bureau de recherche géologique et minières - Service géologique national - BRGM* 71 SGN.313 HYD, 36.
- Ma R., Shi J., Liu J. & Gui C. 2014. Combined Use of Multivariate Statistical Analysis and Hydrochemical Analysis for Groundwater Quality Evolution : A Case Study in North Chain Plain. English. *Journal of Earth Science* Vol. 25.No. 3, 587-597.
<http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1007/s12583-014-0446-2>.
- Madioune D. H. oct. 2012. Etude hydrogéologique du système aquifère du horst de DIASS en condition d'exploitation intensive (bassin sédimentaire sénégalais) : apport des techniques de

- télédétection, modélisation, géochimie et isotopie. fr. Thèse de doct. Université de Liège, oct. 2012.
- Magaritz M., Nadler A., Koyumdjisky H. & Dan J. 1981. The Use of Na/Cl Ratios to Trace Solute Sources in a Semiarid Zone. *Water Resources Research* Vol. 17.No. 3, 602-608.
<http://dx.doi.org/10.1029/WR017i003p00602>.
- Malou R. 2004. Impact du climat sur les ressources en eau souterraine en zone soudano-sahélienne. fr. Thèse de Doctorat en Sciences. Sénégal : Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 2004.
- Mandel S. 2012. Groundwater Resources : Investigation and Development. Elsevier, 2012.
- Marion G. M. 1998. The Geochemistry of Natural Waters : Surface and Groundwater Environments, Third Edition. English. *Journal of Environmental Quality* Vol. 27.No. 1, 245.
- Meyback M. 1987. Global Chemical Weathering of Surficial Rocks Estimated from River-Dissolved Loads. *American Journal of Science* Vol. 287, 401-428.
<http://dx.doi.org/doi:10.2475/ajs.287.5.401>.
- Morell I., Medina J., Pulido A. & Fernandez-Rubio R. 1986. The Use of Bromide and Strontium Ions as Indicators of Marine Intrusion in the Aquifer of Oropesa—Torreblanca (Castellon, Spain). *Proceedings of the 9th Saltwater Intrusion Meeting, Delft*. 1986, 629-640.
- Nagaraju A., Sunil Kumar K. & Thejaswi A. déc. 2014. Assessment of Groundwater Quality for Irrigation : A Case Study from Bandalamottu Lead Mining Area, Guntur District, Andhra Pradesh, South India. en. *Applied Water Science* Vol. 4.No. 4, 385-396.
<http://dx.doi.org/10.1007/s13201-014-0154-1>.
- Najib S., Mehdi K., Riss J., Fadili A., Pulido-Bosch A. & Guessir H. avr. 2017. Salinisation de l'aquifère Libre de La Chaouia Côtière (Azemmour-Tnine Chtouka), Maroc. *Hydrological Sciences Journal* Vol. 62.No. 5, 749-759. <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2016.1162906>.
- Ndiaye O., Diallo A., Matty F., Thiaw A., Fall R. D. & Guisse A. 2012. Caractérisation des sols de la zone des Niayes de Pikine et de Saint Louis (Sénégal). Français. *International Journal of Biological and Chemical Sciences* Vol. 6.No. 1.
<http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v6i1.46>.
- Nguyen T. T., Kawamura A., Tong T. N., Nakagawa N., Amaguchi H. & Gilbuena Jr R. 2015. Clustering Spatio-Seasonal Hydrogeochemical Data Using Self-Organizing Maps for Groundwater Quality Assessment in the Red River Delta, Vietnam. *Journal of hydrology* Vol. 522, 661-673. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.023>.
- Nordstrom D. K. & Campbell K. M. 2014. Modeling Low-Temperature Geochemical Processes. *Surface and groundwater, weathering, and soils*. Elsevier-Pergamon Vol. 5, 37-70.
- Oga M.-S., Lasm T., Yao T. K., Soro N., Saley M. B., Kouassi D. & Gnamba F. 2009. Caractérisation Chimique Des Eaux Des Aquifères de Fracture : Cas de La Région de Tiassalé En Côte d'Ivoire. *European Journal of Scientific Research* Vol. 31.No. 1, 72-87.

- Al-Omran A. M., Mousa M. A., AlHarbi M. M. & Nadeem M. E. A. fév. 2018. Hydrogeochemical Characterization and Groundwater Quality Assessment in Al-Hasa, Saudi Arabia. en. *Arabian Journal of Geosciences* Vol. 11.No. 4, 79. <http://dx.doi.org/10.1007/s12517-018-3420-y>.
- PADEN 2014. *Rapport diagnostic de l'occupation du sol_POAS de la commune de Taïba Ndiaye*. fr. Rapp. tech. 2014, 39.
- Parkhurst D. L. & Appelo C. A. J. 1999. User's Guide to PHREEQC (Version 2) : A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations. *Water-resources investigations report* Vol. 99.No. 4259, 312.
- Peeters L., Bacao F., Lobo V. & Dassargues A. 2007. Exploratory Data Analysis and Clustering of Multivariate Spatial Hydrogeological Data by Means of GEO3DSOM, a Variant of Kohonen's Self-Organizing Map. *Hydrology and Earth System Sciences* Vol. 11.No. 4, 1309-1321.
- Pezeril G., Chateauneuf J. J. & Diop C. E. W. 1986. La Tourbe Des Niayes Au Sénégal : Genèse et Géologie. *Symposium International INQUA/ASEQUA Du. T. Vol. 21*. 1986.
- Piper A. M. 1944. A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water-Analyses. en. *Eos, Transactions American Geophysical Union* Vol. 25.No. 6, 914-928. <http://dx.doi.org/10.1029/TR025i006p00914>.
- Poutoukis D. 1991. Hydrochimie, Teneurs Isotopiques et Origine Des Saumures Associées Aux Gisements de Potasse d'Alsace. Thèse de doct. Orsay : Université Paris-11, 1991.
- Raats P. & Clothier B. juil. 2015. Jim Oster : Scientist, Editor, and Inspired Manager of Water in Irrigated Agriculture. *Agricultural Water Management*. The Jim Oster Special Issue Vol. 157, 1-5. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2015.02.002>.
- Roger J., Noël B., Barusseau J., Serrano O., Nehlig P. & Duvail C. 2009. Notice explicative de la carte géologique du Sénégal à 1/500 000, feuilles nord-ouest, nord-est et sud-ouest. Français. 2009.
- S.L T. N. p. d. Climat Sénégal - Données climatiques. fr. <https://fr.tutiempo.net/climat/senegal.html>.
- Sall M. & Vanclooster M. sept. 2009. Assessing the Well Water Pollution Problem by Nitrates in the Small Scale Farming Systems of the Niayes Region, Senegal. *Agricultural Water Management* Vol. 96.No. 9, 1360-1368. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.010>.
- Sall M. 2010. Transfert de nitrate à travers la zone non saturée du sol vers la nappe phréatique de la zone des Niayes : caractérisation et modélisation. fr. Thèse de doct. UCL - Université Catholique de Louvain, 2010.
- Savaria R. & Sané Ansoumana M. 2019. *Document de capitalisation des expériences (2002-2019) - Version courte. Défense et Restauration des Sols/Conservation des Eaux et des Sols*. fr. Rapport de stage. Thiès : Association pour le Développement des Technologies et la Gestion de l'Espace et des Ressources des Terroirs (ADT GERT), 2019, 36.
- SCET 1968. *Etude Hydrologique : Aménagement Hydro-Agricole Des Niayes*. Rapp. tech. DH101. République du Senegal - Ministère de l'économie rurale - Direction du génie rural, 1968.

- Schoeller H. 1960. Arid Zone Hydrology—Recent Developments. *Soil Science* Vol. 90.No. 2, 150.
- Seck M. 2015. Caractérisation hydrodynamique et hydrochimique de la nappe profonde Maastrichtienne. fr. Mémoire de fin d'étude. Sénégal : Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 2015.
- Simler R. 2006. Logiciel d'hydrochimie Multilangage : Diagrammes. *Laboratoire d'Hydrogéologie d'Avignon, France*.
- Team R. 2015. RStudio : Integrated Development for R. *RStudio, Inc., Boston, MA URL <http://www.rstudio.com>* Vol. 42, 14.
- Vandegans J., Kersabiec A.-M. & Hoenig M. 1997. Spectrométrie d'absorption atomique. fr. *Techniques de l'ingénieur - Spectrométries* Base documentaire : TIB390DUO.ref. article : p2825, 66-72.
- Vesanto J., Himberg J., Alhoniemi E. & Parhankangas J. 1999. Self-Organizing Map in Matlab : The SOM Toolbox. *Proceedings of the Matlab DSP Conference*. T. Vol. 99. 1999, 16-17.
- Wallach D., Makowski D., Jones J. W. & Brun F. jan. 2014. Chapter 3 - The R Programming Language and Software. *Working with Dynamic Crop Models (Second Edition)*. Sous la dir. de Wallach D., Makowski D., Jones J. W. & Brun F. San Diego : Academic Press, jan. 2014, 71-117. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-397008-4.00003-4>.
- Wilcox L. V. 1955. Classification and Use of Irrigation Waters. *USD Circular* No. 969, 19.

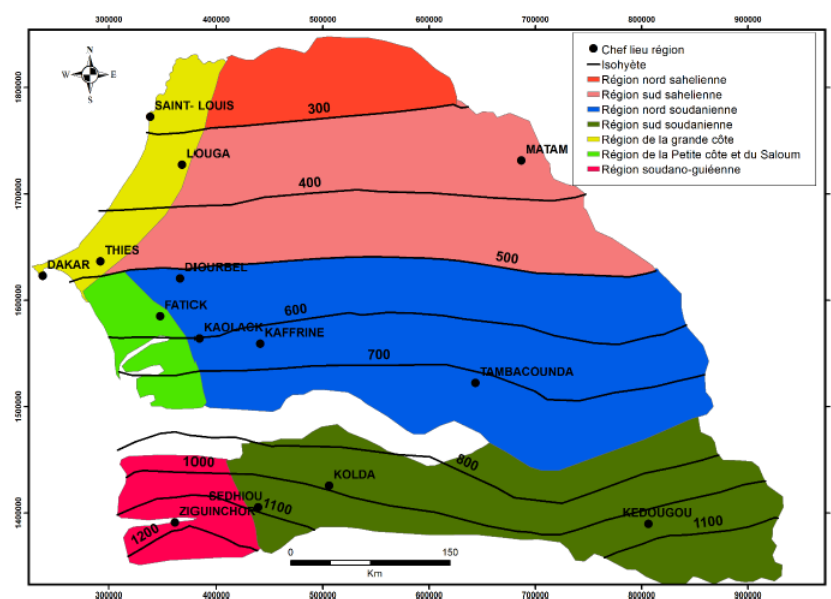
8 Annexes

Annexe 1 – Température, humidité et précipitations des 5 dernières années entre avril 2014 et mars 2019 à Saint-Louis (S.L, p. d.).

	T° moy (°C)	T° max (°C)	T° min (°C)	Humidité (%)	Précipitations (mm)
avr-14	25,1	33,9	18,9	60,9	0,00
mai-14	23,6	28,6	19,7	75,4	0,00
juin-14	26,4	30,9	23,1	78,1	0,00
juil-14	27,9	31,8	25,2	78,7	2,03
août-14	28,4	32	25,1	81,7	80,26
sept-14	29,3	33,2	25,7	80,9	31,24
oct-14	28,7	33,9	24,5	77	14,99
nov-14	25,7	32,9	20,6	72	0,00
déc-14	24,1	32,1	17,7	48,2	0,00
janv-15	22,3	30,8	17,1	44,5	0,00
févr-15	22,3	30,6	17,1	61,6	0,25
mars-15	23,3	31,8	17,6	54,6	0,00
avr-15	23	30,2	18,6	71,1	0,00
mai-15	25,2	30,2	21,7	78	0,00
juin-15	26,2	30,2	23	79,5	0,00
juil-15	28,3	31,4	24,6	77,6	8,13
août-15	29,2	32,7	25,6	80,4	119,36
sept-15	29,1	32,8	25,6	82	88,39
oct-15	29,2	33,8	25,7	78,5	16,51
nov-15	28,4	36,4	22,1	47,1	0,00
déc-15	25,1	33,7	18,4	34,2	0,00
janv-16	25,4	35,6	18,7	37,8	0,00
févr-16	24,6	34,8	18,3	38,6	0,00
mars-16	22,9	31,2	17,7	63,1	0,00
avr-16	24	31,8	19,4	68,6	0,00
mai-16	22,7	28	19,1	77,3	0,00
juin-16	24,7	28,8	21,8	81,8	0,00
juil-16	27,4	30,8	24,6	80,6	68,08
août-16	28,7	32,4	25,7	78,8	22,10
sept-16	29,1	32,8	25,4	82,3	140,71
oct-16	28,9	34,4	24,2	70,7	0,51
nov-16	27	34,8	21,4	56,8	0,76
déc-16	25,7	34,4	19,2	40,1	0,00
janv-17	23,3	32,8	16,1	36,6	0,00
févr-17	22,6	31,4	16,7	55,1	0,00
mars-17	24,8	35	19	54,2	0,00
avr-17	26,3	36	19,6	54,9	0,00
mai-17	24,7	29,3	21,1	75,6	0,00
juin-17	26,9	30,9	23,5	78,1	69,85
juil-17	28,5	32,3	25,3	76,7	91,70
août-17	28,9	32,1	25,5	79,2	89,90
sept-17	29,1	33,1	25,6	80,2	63,49
oct-17	30,7	38,3	22,6	62,7	1,02
nov-17	27,7	36,7	19,4	49,2	0,00
déc-17	23,7	31,3	15,6	37,4	0,00
janv-18	22,7	31,5	13,7	39,4	0,00

févr-18	21,4	28,3	14,1	55	0,00
mars-18	24,9	35,3	16,6	52,7	0,00
avr-18	23,1	31,5	15,8	65,3	0,00
mai-18	22,8	29	16,3	74,8	0,00
juin-18	25,4	29,5	20,1	77,8	12,19
juil-18	27,5	31,3	22,6	76,8	29,97
août-18	28	31,4	22,8	77	88,39
sept-18	28,6	32,7	23,3	80,9	197,09
oct-18	28,7	33,8	23,1	73,1	0,00
nov-18	25,9	34,2	20,1	55,5	0,00
déc-18	25,3	34,2	17,6	35,3	0,00
janv-19	23,3	32,5	16,1	40,2	0,00
févr-19	24,8	33,6	17,7	36,1	0,00
mars-19	23,8	32,6	17	50,5	1,02

Annexe 2 – Carte des différentes zones climatiques et variation spatiale des isoyètes du Sénégal (Malou, 2004).



Annexe 3 – Photos des différents puits étudiés dans la zone de mboro (voir localisation figure 12 page 21); avec a) puits du village de Santhie Ndong (p1); b) puits de Saw (p2); c) puits de Baiti Gueye (p3); d) puits de Keur Mabaye (p4); e) puits Yajine (p5); f) puits de Diama Tiène (p6).



Annexe 4 – Photos des différents puits étudiés dans zone de Mboro (voir localisation figure 12 page 21); avec a) puits de Sine Kane (p7); b) puits de Darou Mboye (p8); c) puits de Andal 1 (p9); d) puits de Darou Beye (p10); e) puits de Mboro-plage (p13).



Annexe 5 – Tableau de valeurs des balances ioniques.

Echantillons	Σ Cations méq/L	Σ Anions méq/L	Balance ionique %
p1	4,69	4,28	4,52
p2	7,39	7,12	1,82
p3	9,58	9,21	1,98
p4	17,50	16,68	2,40
p5	7,63	7,42	1,40
p6	4,00	3,80	2,61
p7	7,60	7,29	2,10
p8	4,81	4,64	1,76
p9	27,83	27,07	1,38
p10	4,12	3,96	1,90
p11	26,86	25,80	2,02
p12	8,65	8,83	-0,98
p13	15,34	15,13	0,67

Annexe 6 – Diagramme des coefficients de corrélation linéaire entre les éléments majeurs (en rouge = très bien corrélé (0,85 à 1,00) ; en orange = bien corrélé (0,70 à 0,85) ; en vert = corrélé (0,55 à 0,70)).

	pH	Ca	Mg	Na	K	Li	HCO ₃	Cl	SO ₄	PO ₄	NO ₃	F	Br	SiO ₂
pH	1,00													
Ca	0,40	1,00												
Mg	0,09	0,82	1,00											
Na	0,27	0,83	0,76	1,00										
K	0,12	0,42	0,37	0,77	1,00									
Li	-0,16	0,54	0,77	0,34	-0,21	1,00								
HCO ₃	0,73	0,72	0,41	0,51	0,19	0,20	1,00							
Cl	0,20	0,85	0,90	0,94	0,63	0,56	0,47	1,00						
SO ₄	0,00	0,47	0,18	0,38	0,33	0,01	0,02	0,28	1,00					
PO ₄	0,35	0,48	0,56	0,79	0,82	0,03	0,37	0,74	0,05	1,00				
NO ₃	-0,01	0,64	0,87	0,81	0,64	0,49	0,28	0,83	0,08	0,71	1,00			
F	-0,08	0,27	0,08	0,14	-0,21	0,30	0,44	0,11	-0,05	-0,22	-0,04	1,00		
Br	0,10	0,75	0,85	0,91	0,63	0,53	0,39	0,98	0,18	0,75	0,80	0,15	1,00	
SiO ₂	-0,01	0,19	0,05	0,00	-0,35	0,31	0,46	0,00	-0,18	-0,26	-0,11	0,91	0,01	1,00

Annexe 7 – Tableau de valeurs des indices de saturation; avec en bleu : sous-saturation; en jaune : sur-saturation; en vert : à l'équilibre chimique.

	Halite	Gypsum	Aragonite	Calcite	Dolomite
p1	-6.66	-2.96	-0.73	-0.58	-1.51
p2	-6.63	-2.22	-1.68	-1.54	-3.01
p3	-6.65	-2	1.12	1.26	2.16
p4	-6.02	-1.41	1.19	1.33	2.28
p5	-6.29	-2.7	-4.45	-4.31	-8.57
p6	-7.26	-2.48	-0.02	0.12	-0.3
p7	-6.7	-2.24	0.78	0.92	1.23
p8	-7.23	-2.63	0.30	0.44	0.53
p9	-5.55	-2.28	1.25	1.40	2.79
p10	-7.13	-3.05	-2.48	-2.34	-4.52
p11	-5.49	-1.38	0.73	0.88	1.56
p12	-6.71	-1.62	-4.51	-4.37	-8.73
p13	-6.12	-1	0.12	0.26	0.15

Annexe 8 – Code implanté dans le programme Rstudio.

```

# Définir le répertoire de travail
setwd("C:/Users/Marine Julémont/Dropbox/MEMOIRE
SENEGAL/Data/Tableaux de données - MJ/R")
# lire le fichier .csv et l'attribuer à la variable SEN19
SEN19 <- read.csv("DonneesdansR.csv", check.names = FALSE)
View(SEN19)
# Appeler la library "corrplot"
library(corrplot)
# Sélectionner les colonnes qui concernent les données et les
attribuer à la variable SEN19_Area
SEN19_Area <- SEN19[c(1:10), c(1:15)]
# Calculer les corrélations avec la fonction cor et préciser qu'il
faut utiliser les données complètes (ne pas tenir compte des valeurs
manquantes NA)
x <- cor(SEN19_Area, use="complete.obs")
# Réaliser une matrice de corrélation :
# tl.col="black" pour que la couleur des titres soit noire
# tl.str=45 pour incliner les titres à 45°
# type = "upper" pour avoir une demi-matrice (et donc pas de redite)
# method="ell" pour avoir des ellipses colorées illustrant la
corrélation (bleu, corrélation positive et rouge, corrélation
négative ; cercle = pas de corrélation, ellipse étirée = corrélation
élevée)
corrplot(x, tl.col="black", tl.srt=45, type="upper", method="ell")
# Variante : method="number" pour avoir la valeur chiffrée du
coefficient de corrélation
corrplot(x, tl.col="black", tl.srt=45, type="upper", method="number")
# variante : corrplot.mixed pour avoir en bas, les valeurs chiffrées
du coefficient de corrélation (lower="number") et en haut, les
ellipses colorées (upper="ell")
corrplot.mixed(x, tl.col="black", lower="number", upper="ell")

# Sélectionner les colonnes qui concernent les données corrigées et
les attribuer à la variable SEN19_corrige
SEN19_corrige <- SEN19[c(1:10), c(1:15)]
y <- cor(SEN19_corrige, use="complete.obs")
corrplot(y, tl.col="black", tl.srt=45, type="upper", method="ell")
corrplot(y, tl.col="black", tl.srt=45, type="upper", method="number")
corrplot.mixed(y, tl.col="black", lower="number", upper="ell")

```


Annexe 9 – Tableau des données de localisation de la zone d'étude de la campagne de mars 2019.

Echantillons	Localité	x UTM	y UTM	z UTM	Occupation	Exploitation
p1	Santhie Ndong	294897,701	1669552,439	19,568	verger de village	oui
p2	Saw	285887,14	1660517,634	4,694	agriculture	oui
p3	Baiti Gueye	294232,433	1659815,979	48,805	village	non
p4	Keur Mabaye	297891,786	1658769,257	62,408	village	non
p5	Yajine	309344,325	1656467,95	37,036	verger de village	oui
p6	Diama Tiène	317707,106	1666149,427	40,451	village	oui
p7	Sine Kane	320830,471	1672372,844	45,324	village	non
p8	Darou Mboye	302347,617	1675452,394	32,259	village	non
p9	Andal 1	305025,089	1679824,594	36,278	village	non
p10	Darou Beye	309733,367	1690188,267	20,675	village	oui
p11	Diogo-sur-mer	309733,169	1690188,4	20,918	village	oui
p12	Ndjiligne	306773,742	1686204,46	29,225	village	oui
p13	Mboro Plage	295428,566	1679615,438	0,281	agriculture	oui

Annexe 10 – Tableau des paramètres physico-chimique de la campagne de mars 2019 à gauche et des analyses de laboratoire à droite.

Ech.	pH	cond.el $\mu\text{S/cm}$	redox (eH) mV	Redox réelle mV	ox.diss mg/L	T °C	Résistivité (à 25°C) $\Omega\cdot\text{cm}$	T °C	pH	pHs Saturation
p1	7,23	563	28,0	-172,0	2,54	24,9	1965,8	22,9	7,86	8,41
p2	5,84	963	150,4	-49,6	4,39	26,2	1208,3	22,8	7,01	8,59
p3	7,66	1038	8,9	-191,1	3,63	28,3	1089,4	22,8	8,32	7,01
p4	7,13	1921	-30,3	-230,3	4,04	28,6	590,0	23,0	8,23	6,79
p5	4,54	937	302,2	102,2	4,08	30,2	1120,6	23,2	4,83	9,51
p6	6,95	413	107,0	-93,0	-	27,3	2413,7	23,2	7,91	7,78
p7	7,07	926	-94,3	-294,3	3,28	25,8	1310,4	23,3	8,24	7,30
p8	7,28	620	-130,4	-330,4	0,61	26,8	2008,4	23,5	8,11	7,63
p9	7,40	2890	86,9	-113,1	3,49	27,8	351,3	23,6	8,28	6,69
p10	5,80	579	156,4	-43,6	5,43	27,4	2102,2	23,7	6,75	9,12
p11	7,00	2840	100,9	-99,1	3,4	26,2	360,4	23,9	8,04	7,00
p12	4,44	986	284,1	84,1	5,08	27,8	1017,3	23,9	4,47	9,33
p13	6,56	1600	20,0	-180,0	-	27,4	653,0	24,0	7,74	7,37

Annexe 11 – Tableaux des données des analyses de laboratoire réalisées en avril 2019.

Ech.	TA	TAC	CO₂ (libre)	Fe		Mn		SiO₂
	°f	°f	mg/L	mg/L	méq/L	mg/L	méq/L	mg/L
p1	0,0	5,9	0,69	0,70	0,04	0,09	0,00	29,70
p2	0,0	1,4	1,17	0,02	0,00	0,29	0,01	20,48
p3	0,3	23,8	0,95	0,02	0,00	n.d.	0,00	40,14
p4	0,3	26,5	1,31	0,03	0,00	n.d.	0,00	41,82
p5	0,0	0,2	34,59	0,03	0,00	0,45	0,02	32,26
p6	0,0	8,2	0,85	0,02	0,00	n.d.	0,00	27,44
p7	0,2	16,4	0,79	0,03	0,00	n.d.	0,00	23,09
p8	0,1	12,5	0,82	0,04	0,00	0,19	0,01	19,63
p9	0,3	24,0	1,05	n.d.	0,00	n.d.	0,00	29,98
p10	0,0	0,7	1,06	n.d.	0,00	0,37	0,01	14,16
p11	0,1	16,4	1,26	n.d.	0,00	n.d.	0,00	15,63
p12	0,0	0,2	106,85	0,04	0,00	0,72	0,03	29,61
p13	0,0	7,4	1,14	0,04	0,00	0,03	0,00	18,54

Annexe 12 – Tableau des données des analyses de laboratoire d'avril 2019 - Anions.

Ech.	CO ₃ ²⁻		HCO ₃ ⁻		Br ⁻		Cl ⁻		F ⁻		NO ₂ ⁻		NO ₃ ⁻		PO ₄ ³⁻		SO ₄ ²⁻	
	mg/L	mécq/L	mg/L	mécq/L	mg/L	mécq/L	mg/L	mécq/L	mg/L	mécq/L	mg/L	mécq/L	mg/L	mécq/L	mg/L	mécq/L	mg/L	mécq/L
p1	0,29	0,01	71,36	1,17	0,26	0,00	97,21	2,74	0,14	0,01	n.d.	0,00	n.d.	0,00	0,52	0,02	16,30	0,34
p2	0,01	0,00	17,06	0,28	0,29	0,00	132,39	3,73	0,08	0,00	n.d.	0,00	146,68	2,37	n.d.	0,00	35,54	0,74
p3	3,27	0,11	283,59	4,65	0,31	0,00	131,77	3,71	0,28	0,01	n.d.	0,00	0,79	0,01	n.d.	0,00	33,78	0,70
p4	2,97	0,10	317,15	5,20	0,53	0,01	235,25	6,63	0,44	0,02	2,19	0,05	140,67	2,27	0,12	0,00	115,70	2,41
p5	0,00	0,00	3,34	0,05	0,78	0,01	221,74	6,25	0,31	0,02	n.d.	0,00	50,82	0,82	n.d.	0,00	13,17	0,27
p6	0,44	0,01	99,09	1,62	0,13	0,00	59,47	1,68	0,10	0,01	n.d.	0,00	6,41	0,10	n.d.	0,00	17,78	0,37
p7	1,88	0,06	196,15	3,22	0,22	0,00	115,10	3,24	0,09	0,00	n.d.	0,00	19,64	0,32	n.d.	0,00	21,37	0,44
p8	1,07	0,04	150,25	2,46	0,22	0,00	64,56	1,82	0,07	0,00	0,23	0,01	n.d.	0,00	0,55	0,02	14,06	0,29
p9	3,01	0,10	286,56	4,70	1,30	0,02	547,96	15,44	0,16	0,01	0,07	0,00	400,14	6,45	1,02	0,03	15,61	0,32
p10	0,00	0,00	8,54	0,14	0,21	0,00	70,30	1,98	0,02	0,00	0,13	0,00	103,13	1,66	n.d.	0,00	8,35	0,17
p11	1,20	0,04	197,58	3,24	1,19	0,01	474,99	13,38	0,06	0,00	1,52	0,03	369,93	5,97	1,66	0,05	147,54	3,07
p12	0,00	0,00	4,51	0,07	0,23	0,00	112,88	3,18	0,15	0,01	0,08	0,00	182,95	2,95	n.d.	0,00	125,37	2,61
p13	0,27	0,01	89,69	1,47	0,49	0,01	247,16	6,96	0,07	0,00	3,99	0,09	2,36	0,04	n.d.	0,00	315,10	6,56

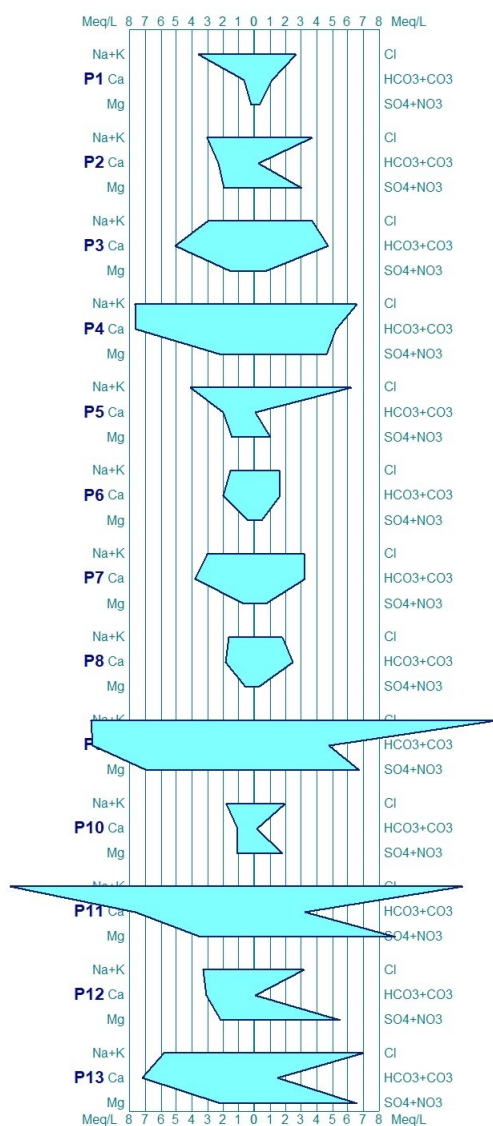
Annexe 13 – Tableau de données des analyses de laboratoire d’avril 2019 - Cations.

Ech.	Ca ²⁺		K ⁺		Li ⁺		Mg ²⁺		Na ⁺		NH ₄ ⁺		Sr ²⁺	
	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L	mg/L	meq/L
p1	13,62	0,68	4,27	0,11	0,02	0,00	2,76	0,23	81,07	3,52	2,42	0,13	0,53	0,01
p2	47,15	2,35	3,51	0,09	0,03	0,00	24,13	1,99	67,73	2,94	n.d.	0,00	0,45	0,01
p3	102,12	5,09	2,70	0,07	0,02	0,00	17,90	1,47	67,21	2,92	n.d.	0,00	0,76	0,02
p4	153,16	7,64	8,80	0,23	0,04	0,01	25,97	2,14	171,81	7,47	n.d.	0,00	1,16	0,03
p5	40,82	2,04	7,78	0,20	0,05	0,01	17,78	1,46	90,04	3,91	n.d.	0,00	0,46	0,01
p6	41,13	2,05	2,40	0,06	n.d.	0,00	5,03	0,41	33,67	1,46	n.d.	0,00	0,40	0,01
p7	77,15	3,85	5,46	0,14	0,03	0,00	8,24	0,68	67,21	2,92	n.d.	0,00	0,52	0,01
p8	37,82	1,89	6,10	0,16	n.d.	0,00	7,25	0,60	33,97	1,48	12,30	0,68	0,30	0,01
p9	208,42	10,40	15,13	0,39	0,12	0,02	83,74	6,89	232,06	10,09	n.d.	0,00	2,13	0,05
p10	22,92	1,14	4,11	0,11	0,03	0,00	13,73	1,13	39,17	1,70	0,45	0,03	0,31	0,01
p11	153,62	7,66	108,16	2,77	n.d.	0,00	42,21	3,47	297,23	12,92	n.d.	0,00	1,66	0,04
p12	61,78	3,08	13,39	0,34	0,05	0,01	26,87	2,21	68,09	2,96	0,74	0,04	0,49	0,01
p13	144,16	7,19	10,98	0,28	0,04	0,01	26,85	2,21	127,80	5,56	1,34	0,07	0,94	0,02

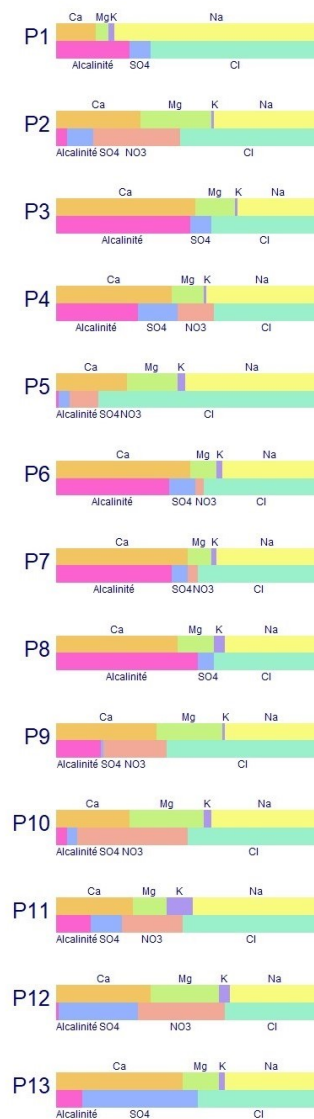
Annexe 14 – Valeurs de l’eau de mer prélevée dans au large de Saint-Louis (Gning, 2015).

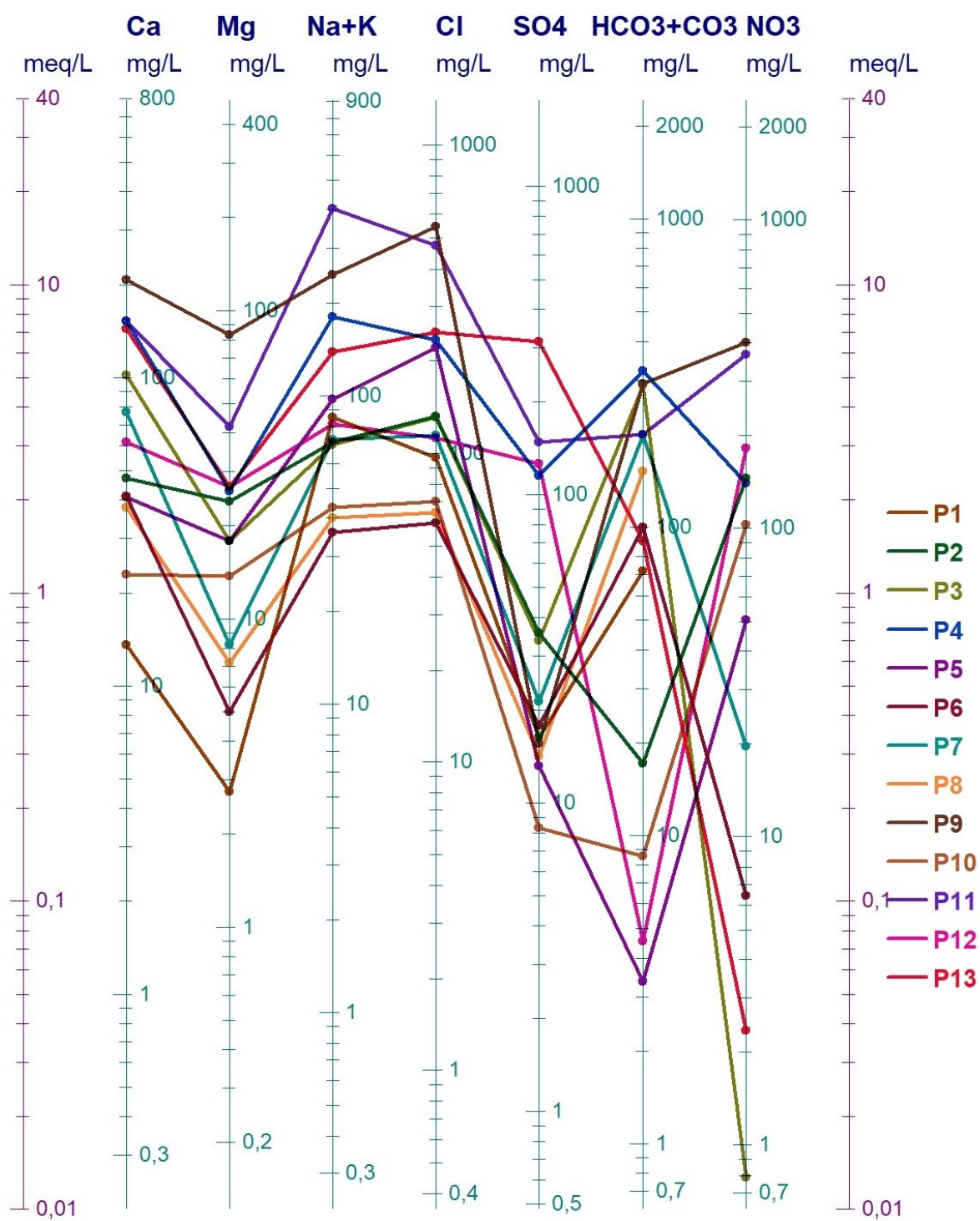
	Cond. el.		pH	Ca ²⁺		Mg ⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻		HCO ₃ ⁻	
	μS/cm			meq/L		meq/L	meq/L	meq/L	meq/L	meq/L		meq/L	
EM	41300	7,1		20,77		92,65	413,24	6,96	455,15	52,11		2,00	

Annexe 15 – Diagrammes de Stiff de l'ensemble des 13 échantillons de la campagne de mars 2019.

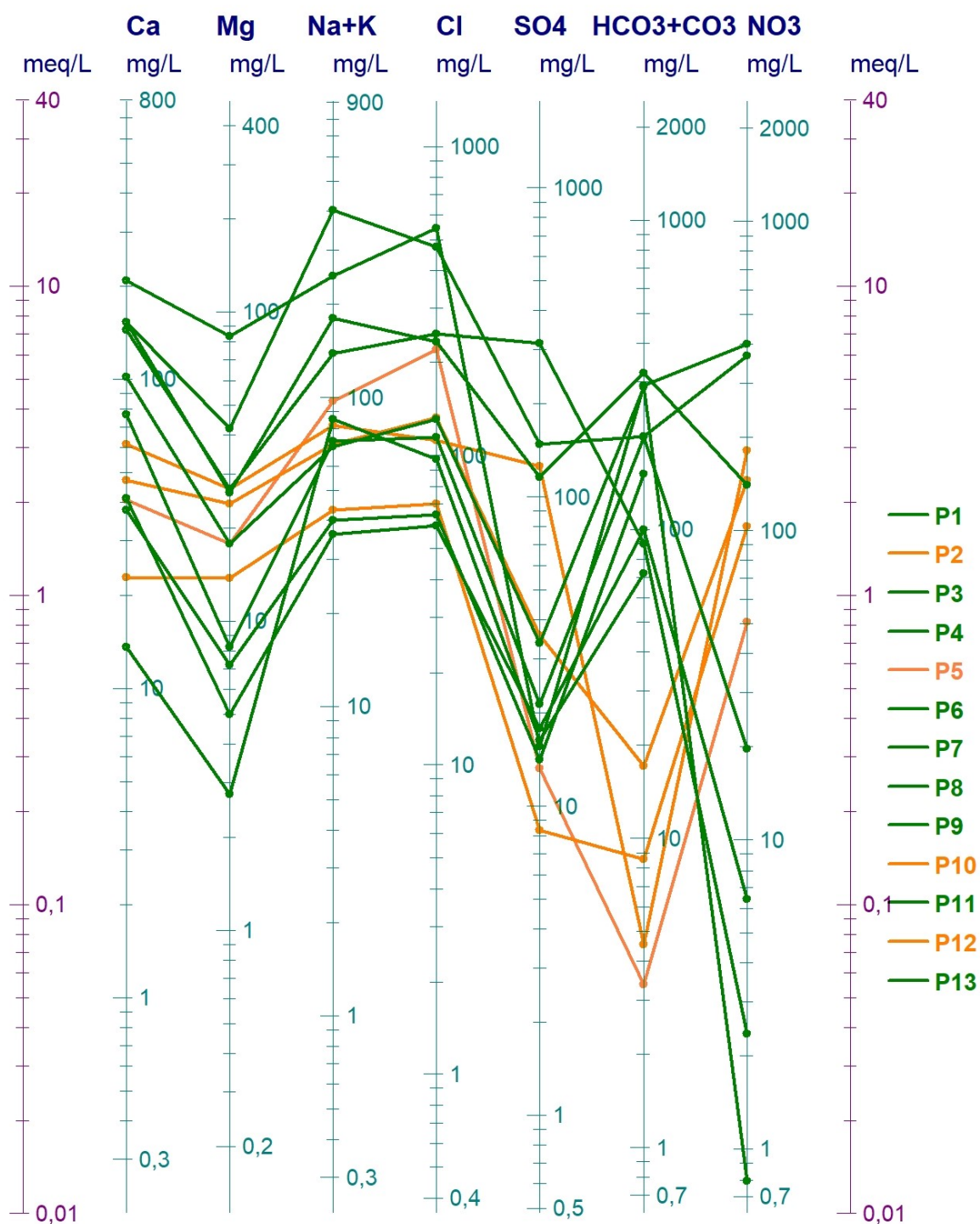


Annexe 16 – Diagrammes de Stabler de l'ensemble des 13 échantillons de la campagne de mars 2019.

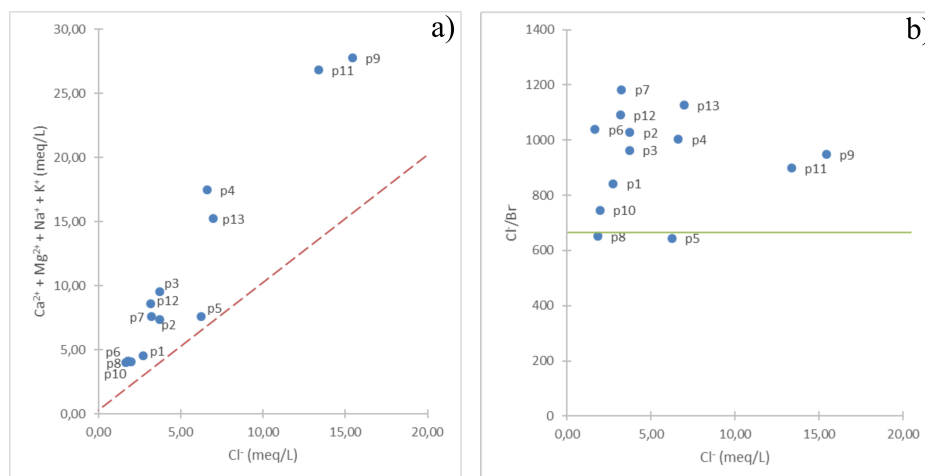


Annexe 17 – Diagramme de Schoeller de l'ensemble des 13 échantillons de la campagne de mars 2019.

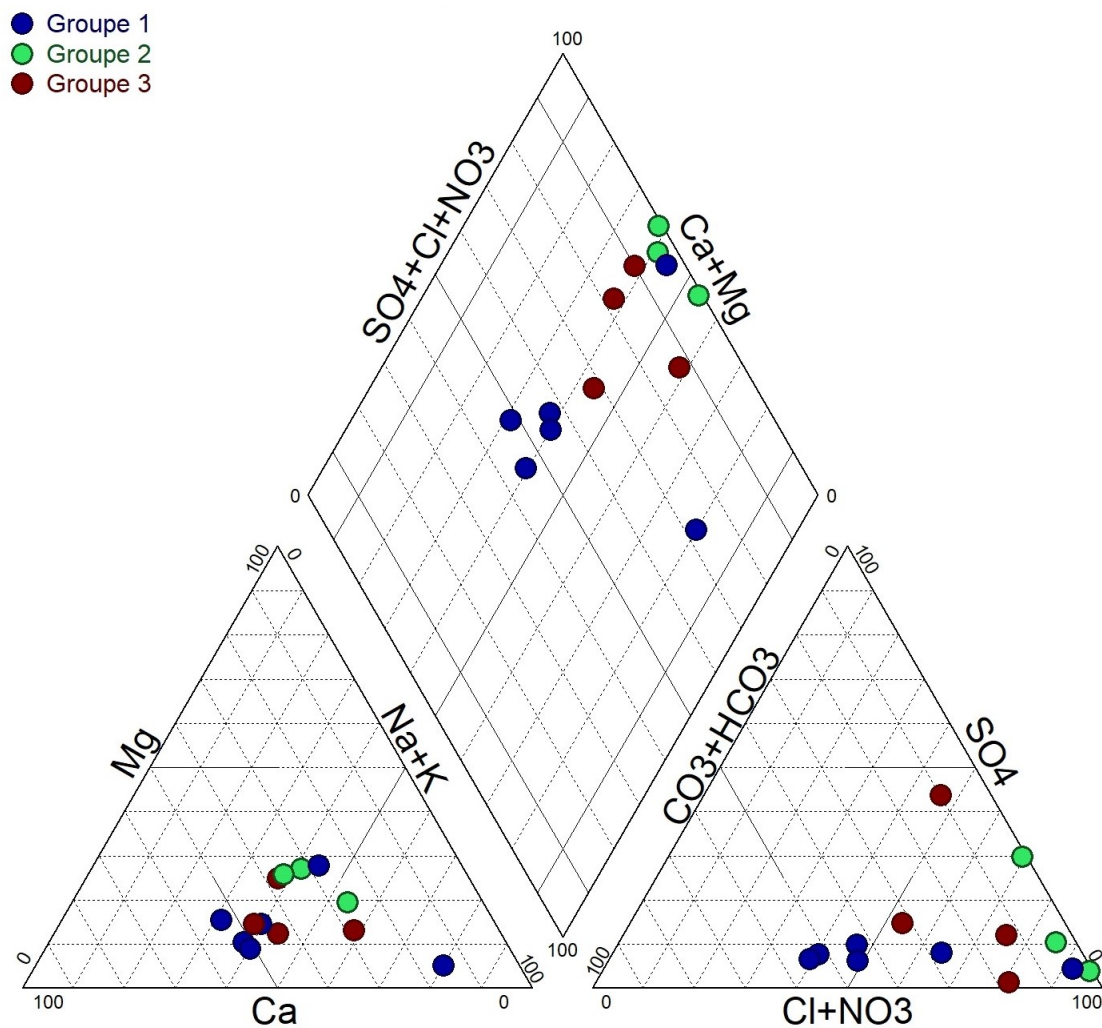
Annexe 18 – Diagramme de Schoeller de l'ensemble des 13 échantillons de la campagne de mars 2019 classé afin de mettre en évidence la faible concentration en $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ associé une concentration en Mg^{2+} moins faibles par rapport au Ca^{2+} et $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ que pour les autres échantillons.

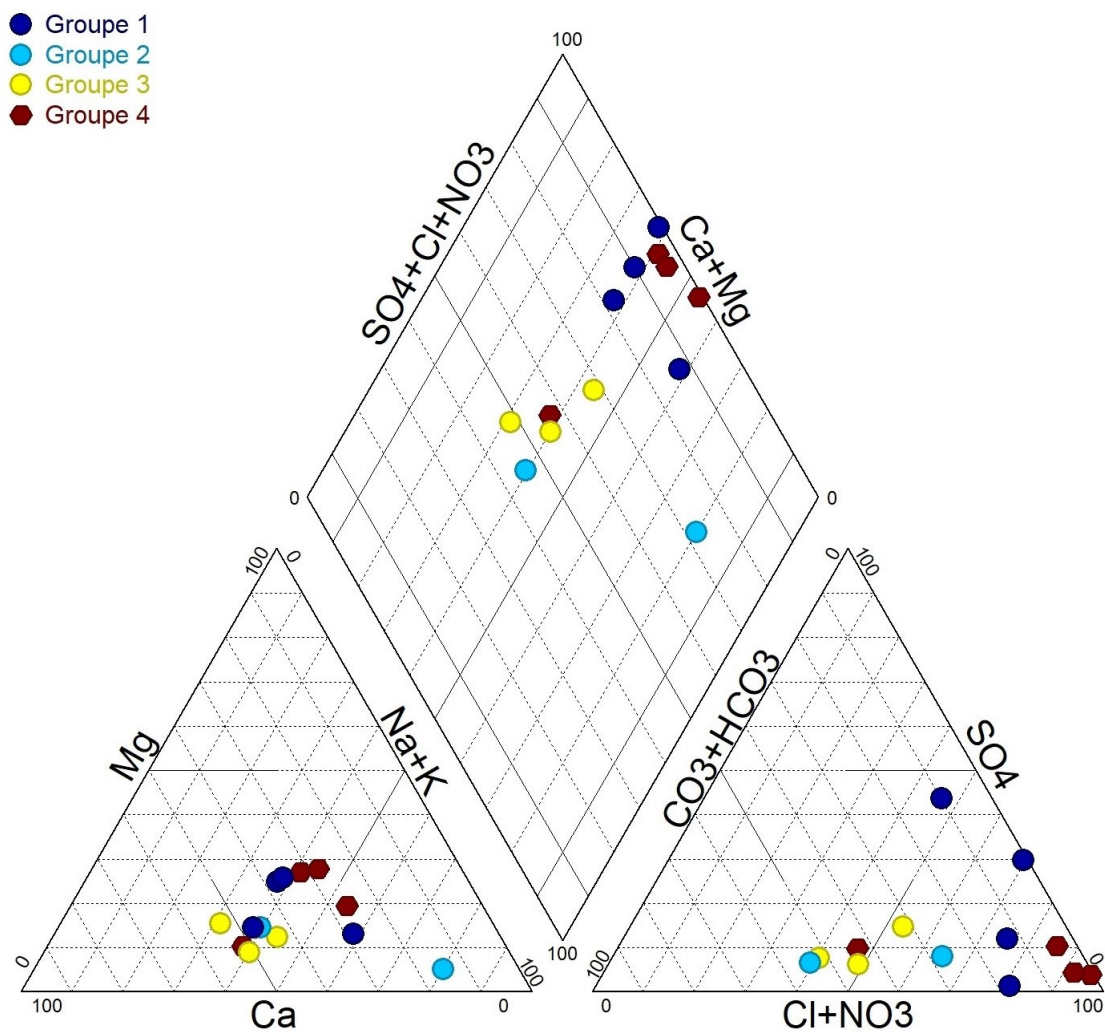


Annexe 19 – Diagramme binaires de a) $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+$ en fonction de Cl^- et b) le rapport entre Cl^-/Br^- en fonction de Cl^- .



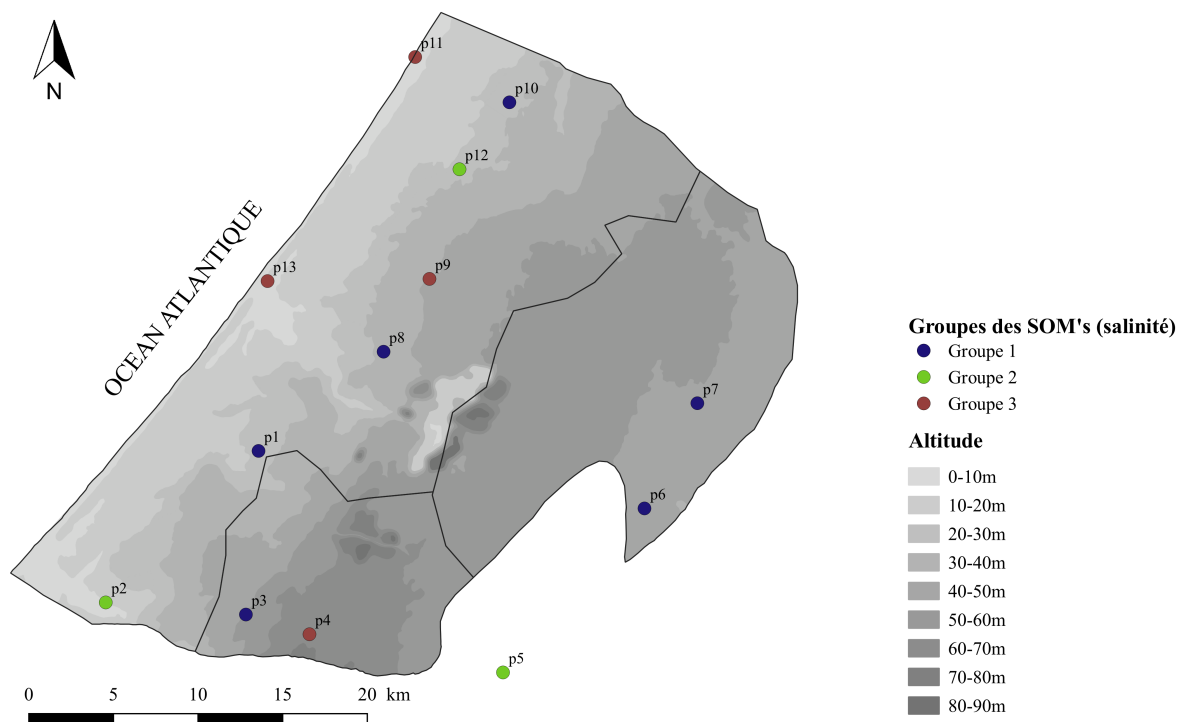
Annexe 20 – Diagramme de Piper des échantillons colorés en fonction des groupes des SOM's liés à la salinité.



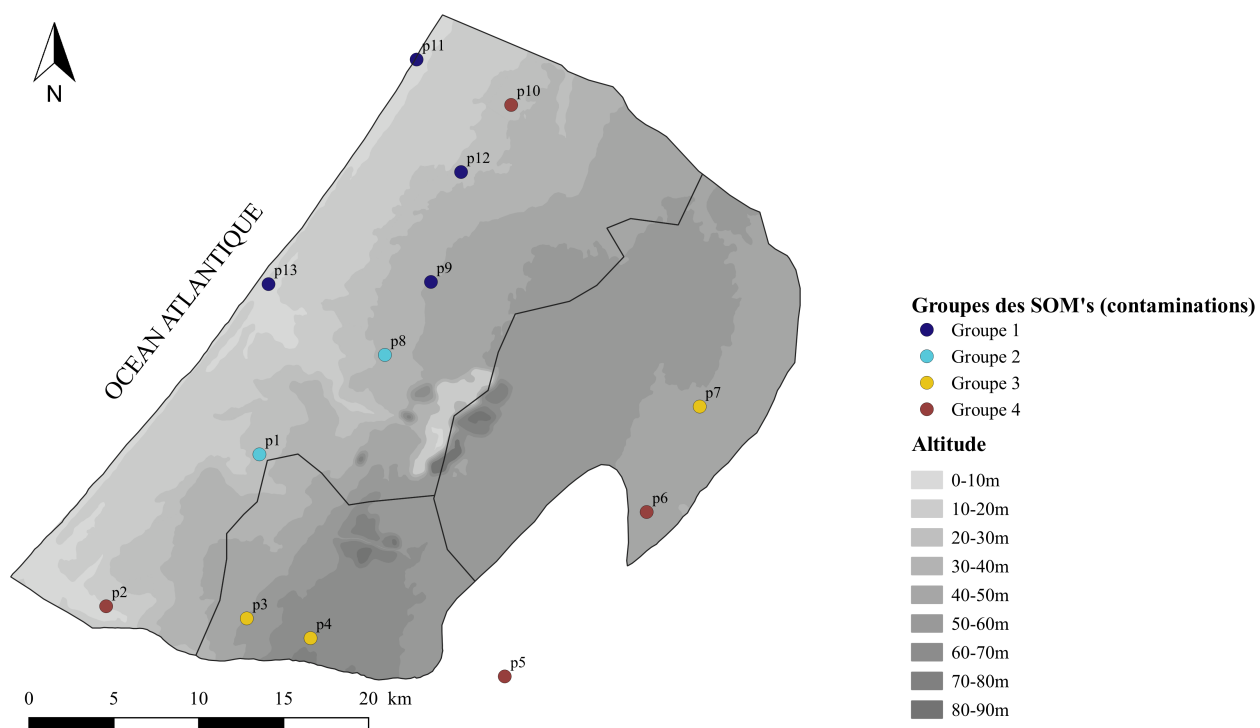
Annexe 21 – Diagramme de Piper des échantillons colorés en fonction des groupes des SOM's liés aux contaminations.

Annexe 22 – Localisation des échantillons colorés en fonction des groupes des SOM's liés à la salinité.

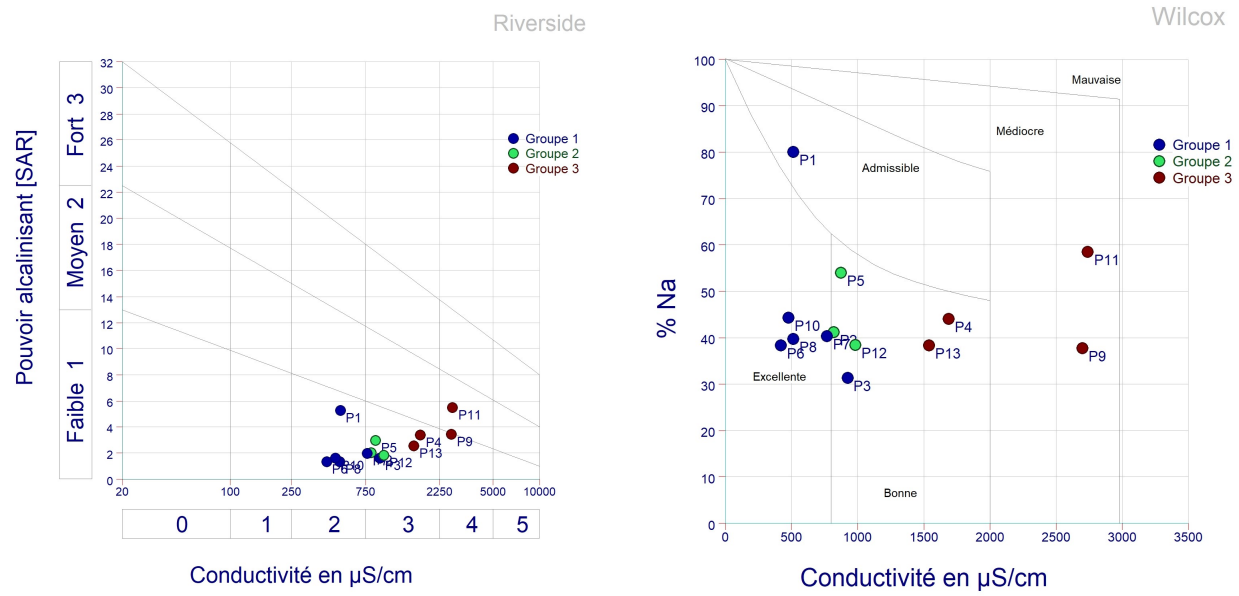
Carte des groupes des SOM's liés à la salinité

**Annexe 23** – Localisation des échantillons colorés en fonction des groupes des SOM's liés aux contaminations.

Carte des groupes des SOM's liés aux contaminations



Annexe 24 – Diagramme de Riverside (gauche) et diagramme de Wilcox (droite) pour les échantillons de la campagne de mars 2019 regroupés selon les ensembles des SOM's liés à la salinité.



e