

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR



Ecole Doctorale « Eau, Qualité et Usages de L'eau »



FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

THESE DE DOCTORAT UNIQUE

En collaboration avec l'Université de ROUEN-NORMANDIE



Spécialisation : HYDROGEOLOGIE – GEOCHIMIE

Année 2016-2017 N° d'ordre

Présentée par :

Mariama KABA

**Etude Hydrogéologique régionale et
Fonctionnement hydrogéochimique des
zones humides du Littoral Nord / Sénégal**

Soutenue publiquement le 06 Décembre 2017

Composition du Jury :

Président :	Cheikh Bécaye	GAYE	Professeur (UCAD)
Rapporteurs :	Mamadou	FALL	Maître de Conférences (UCAD)
	Gil	MAHE	Directeur de Recherche (IRD) – Hydrosociences Montpellier
Directeur :	Serigne	FAYE	Professeur (UCAD)
Co-encadrants :	Benoit	LAIGNEL	Professeur, Université Rouen – Normandie
	Valérie	MESNAGE	Maître de Conférences-HDR, Université Rouen – Normandie
Examinatrice :	Seynabou	CISSE FAYE	Maître de Conférences (UCAD)

DEDICACES

Je rends grâce à **ALLAH** de m'avoir donné la santé, le courage et la force de mener à terme ce travail.

Je dédie ce travail :

A ma **MERE**, à mon **PERE**

Je ne saurais jamais vous remercier assez pour tous les efforts et les sacrifices que vous avez consentis pour assurer mon éducation et ma réussite. Vous m'avez appris à travailler dans la rigueur, la dignité, le respect de soi et de l'autre, la droiture, et la persévérance. Votre immense amour, vos encouragements incessants et vos critiques ont forgé ma personne. Je vous rends hommage par ce modeste travail en guise de mon infinie reconnaissance.

Qu'Allah le tout puissant vous garde encore longtemps et en bonne santé auprès de nous afin que nous soyons votre fierté;

A mes tuteurs, **Pape Ndiouck FAYE** et **Fanta KABA**

Je les remercie du fond cœur. Ce sont des parents exceptionnels et exemplaires d'une simplicité et d'une générosité hors du commun. Vous êtes des références pour nous. Puisse Allah vous accorder santé, longue vie et vous récompenser au centuple. Je vous témoigne par ce modeste travail ma profonde reconnaissance.

A **mes Oncles, Tantes, toute ma Famille et Ami(e)s**. Merci pour vos prières et votre soutien constant

A **tous mes défunts grands-parents, membres de la famille et amis**, mon souhait était de vous voir aujourd'hui parmi nous mais le destin en a décidé autrement.

Puisse Allah vous accueillir dans son paradis éternel.

A **toutes les personnes** qui ont de près ou de loin participé à la réalisation de ce document.

AVANT-PROPOS

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma reconnaissance et mes sincères remerciements à tous ceux qui de près ou de loin, par leurs actes ou conseils, ont concouru à l'aboutissement de ce travail.

Mes remerciements vont d'abord à l'endroit des membres du jury :

- **Professeur Serigne FAYE**, Responsable scientifique de cette thèse, Directeur de l'Ecole Doctorale Eau Qualité et Usages de l'Eau à l'Université de Dakar. Vous avez guidé mes premiers de chercheur tout d'abord en DEA et par la suite en thèse. Vous m'avez inculqué la rigueur scientifique de la conception à la réalisation d'un projet de recherche. Vos compétences, vos critiques minutieuses et vos conseils ont apporté des orientations claires à la problématique de cette thèse. Je veux aussi saluer votre esprit d'ouverture, votre générosité et les valeurs humaines dont vous avez fait montre tout au long de ces longues années. Nos discussions ont toujours été très enrichissantes. Mes très sincères et vifs remerciements pour tout ce que vous avez fait pour moi et l'aboutissement de ce travail. Trouvez ici l'expression de ma profonde gratitude ;

 - **Docteur Valérie MESNAGE**, de l'Université de Rouen Maître de Conférences-HDR, Co-encadrante de la thèse. Directrice du Département Géosciences et Environnement, Responsable du parcours Master 2 Eau-Sol-Environnement. Vous vous êtes beaucoup investie pour la collaboration entre les Universités de Rouen et de Dakar. Vous n'avez ménagé aucun effort pour le bon déroulement de ces travaux autant pour les campagnes de terrain où vous avez été très souvent présente avec moi sous le chaud soleil sénégalais que pour les analyses en laboratoire. Votre simplicité, vos valeurs humaines et votre enthousiasme ont facilité mon intégration à Rouen. Nos échanges scientifiques très fructueux ont contribué à l'amélioration de ce travail. Veuillez trouver ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

 - **Professeur Benoit LAIGNEL**, de l'Université de Rouen co-encadreur de la thèse, Responsable de l'unité de recherche Environnement-Géosciences à l'Ecole Doctorale Normande Biologie Intégrative, Santé et Environnement. Je vous remercie d'avoir accepté de co-encadrer ce travail. Vos judicieuses observations et vos suggestions pertinentes ont contribué à améliorer la qualité du document.
- A travers votre personne, je veux remercier le Pr Robert Lafite Directeur du Laboratoire de Morphodynamique Continentale et Côtière de Rouen/Caen pour l'accueil chaleureux pendant tous mes séjours ainsi que l'ensemble des enseignants-chercheurs et le personnel du laboratoire mention spéciale au Pr. Jean-Paul Dupont qui ont contribué de près ou de loin à ma formation et à mes travaux de recherche.

- **Professeur Cheikh Bécaye GAYE**, Responsable de la formation doctorale Hydrogéologie de l'Ecole Doctorale Eau Qualité et Usages de l'Eau et Membre de l'Académie des Sciences du Sénégal. Vos conseils et vos critiques constructives ont été toujours d'un grand apport.
Merci Pr. pour l'honneur que vous me faites de présider ce jury.
A travers votre personne, je remercie tous les enseignants et le personnel de la faculté des sciences et techniques en particulier ceux du département de géologie pour avoir contribué de près ou de loin à ma formation et à mes travaux de recherche ;
- **Docteur Gil MAHE**, Directeur de recherche à HydroSciences de Montpellier et Coordinateur du programme FRIEND UNESCO/IHP, Merci de faire partie de ce jury. Je tiens à vous exprimer toute ma reconnaissance pour l'évaluation critique de ce document. Vos remarques et suggestions pertinentes ont contribué à l'amélioration de ce travail ;
- **Professeur Mamadou FALL**, de l'Université de Dakar, département de Géologie à Dakar, Merci de faire partie de ce jury. Je veux vous témoigner toute ma reconnaissance pour l'examen minutieux ce manuscrit. Votre expérience sur les zones humides des Niayes et nos discussions très instructives ont contribué à améliorer ces travaux.
- **Docteur Seynabou CISSE FAYE**, de l'Université de Dakar, Maître de Conférences et Chef du département de Géologie, je voudrais vous témoigner ma reconnaissance pour votre participation à mon jury et aussi pour avoir co-encadrer et siéger à mon jury de DEA. Vos observations pertinentes et vos encouragements ont toujours été d'un grand apport. Je vous adresse ici mes sincères remerciements ;

J'adresse également mes remerciements aux organismes qui ont contribué au financement de ces travaux : le Service de Coopération et d'Appui Culturelle (SCAC) et le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche du Sénégal pour les mobilités, L'IFS (Institute for Sciences Foundation), Le Service des Relations Internationales et le projet SCALE de l'Université de Rouen pour l'achat d'équipement, les campagnes de terrain et frais d'analyses ;

Ces remerciements s'adressent également au personnel des structures : Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM), Centre de Suivi Ecologique (CSE), Agence Nationale de la Démographie et de la Statistique (ANDS), Direction de Gestion et de Planification des Ressources en Eau (DGPRE), SONES/SDE (SOCIÉTÉ Nationale des Eaux du Sénégal) mention spéciale Mr Saliou Ngom qui ont contribué à la collecte des données existantes.

Je veux exprimer ma reconnaissance aux **docteurs** Ibrahima Mall, Ousmane Coly Diouf, Mathias Diédhiou, Héléne Madioune Diouf, Issa Sakho, Soda Loum, Serafina Sechi, Stephane Chedville, Léa Durand pour leurs conseils et l'attention qu'ils ont porté sur ce travail ;

Je veux remercier les collègues **doctorants et Masters de l'équipe SFaye** : Koningue, Abakar, Lemine, Ousseynou, Ali, Venyo, Huguette, Omarou, Terence, Konaté, Mariétou, Amina, Fatou ; et ceux du **laboratoires M2C Rouen/Caen** Aziz, Arnaud, Antonin pour les discussions fructueuses et les moments de convivialité passés ensemble.

Je remercie ma chère amie et sœur **Ndeye Maguette Dieng Ndao** pour son amitié et son soutien constant. Qu'Allah nous protège et nous comble de ses bienfaits.

Je remercie tout le personnel technique et administratif du Département de Géologie en particulier Moussa Sow, Babacar Diop, les secrétaires Aminata et Maguette, Aby et Mme Ndiaye toujours serviables ;

Je remercie aussi le département de Biologie végétale pour le soutien logistique

Un grand Merci à ma fidèle équipe de Terrain avec qui nous avons bravé toutes les difficultés et parcourus tous les recoins du Littoral Nord : Mall pour son soutien constant de la préparation à la réalisation des missions, à grand Ndoye, Bodian, Babacar, Coly, Mathias, Dialiba,, Tidjani, Salif. Merci aussi au soutien de Djibi et Mignane Sakho. Mention spéciale à mes encadreurs Valérie, Mr Faye et Benoit pour leur touche d'experts sur le terrain.

Un grand Merci aux familles Kaba/Caba, Touré, Faye, Cissé, Gueye Bara, Sakho, Soumaré, Dieng, Diouf, Ndiaye, Thiam ; à toute la communauté sénégalaise de Rouen, à la promotion «Dessamba Dieng» sans oublier Kissima, Belinda, Clotilde, Alioune, Pape, les @ers

Loin d'avoir cité tout le monde je souhaite que tous ceux qui ont fait rayonner ces années académiques trouvent ici ma profonde reconnaissance.

MERCI A TOUS

LISTE DES ACRONYMES

ACP	: Analyse en Composantes Principales
AEP	: Alimentation en Eau Potable
ANACIM	: Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie
ANSD	: Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie
BRGM	: Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CE	: Conductivité Electrique
CHA	: Classification Hiérarchique Ascendante
COD	: Carbone Organique Dissous
COP	: Carbone Organique Particulaire
CSE	: Centre de Suivi Ecologique
DGPRE	: Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau
DML	: Droite Météorique Locale
DMM	: Droite Météorique Mondiale
DTGC	: Direction des Travaux Géographiques et Cartographiques
ETP	: EvapoTranspiration Potentielle
ETR	: EvapoTranspiration Réelle
GCO	: Grande Côte Operations
GPS	: Global Positioning System
ICS	: Industries Chimiques du Sénégal
IH	: Indice Hydrogène
IO	: Indice Oxygène
MNT	: Modèle Numérique de Terrain
MO	: Matière Organique
OMS	: Organisation Mondiale de Santé
PH	: Potentiel Hydrogène
RMS	: Root Mean Squared Residual
SDE	: Sénégalaise Des Eaux
SMOW	: Standard Mean Ocean Water
SONES	: SOciété Nationale des Eaux du Sénégal
TDS	: Total Dissolve Salt
TU	: Tritium Unity
ZNS	: Zone Non saturée

RESUME

Située dans la partie occidentale du Sénégal, le Littoral Nord est une bande côtière de 110 km qui s'étend de Kayar à Saint Louis. Elle est caractérisée par un climat soudano-sahélien au Sud à sahélien au Nord et par une succession de dunes et d'inter-dunes. Ces dernières sont des zones humides localement appelées « Niayes » à fort potentiel agricole. Elles sont menacées par la pression anthropique, les changements climatiques et environnementaux associés au développement du secteur minier. Cette thèse présente ainsi deux axes de réflexion : (i) évaluer quantitativement et qualitativement la ressource en eaux souterraines du Littoral Nord ainsi que sa variabilité spatio-saisonnière à l'échelle régionale au vu des nouvelles contraintes ; (ii) comprendre le fonctionnement hydrogéochimique et sédimentaire de l'écosystème des Niayes qui caractérise le secteur à l'échelle locale. La stratégie d'échantillonnage à l'échelle régionale a été faite par le suivi piézométrique, physico-chimique, chimique et géochimique des eaux de la nappe sur trente-deux sites au cours de quatre campagnes. A l'échelle locale, trois sites pilotes, Mboro, Lompoul et Potou, ont été ciblés respectivement au Sud, Centre et Nord de la grande côte.

Ainsi, la fluctuation de la nappe montre un gradient décroissant de la ressource du Sud au Nord et une hausse significative au cours de l'année 2010 où la pluviométrie a été supérieure à 400 mm de Mboro à Saint Louis. Cette nappe présente des conductivités variant entre 162 $\mu\text{s/cm}$ en saison humide à 3590 $\mu\text{s/cm}$ en saison sèche. Les pH généralement acides sont dus à une forte activité agricole et industrielle surtout au Sud du secteur. La recharge de la nappe est variable en fonction des sites et des conditions du milieu avec en moyenne de 3 mm/an au Nord à 44 mm/an au Sud. Cette nappe présente quatre familles chimiques (Ca-SO_4 , mixte- Cl/SO_4 , Na-Cl , mixte- Cl et mixte- HCO_3) à dominance Na-Cl en saison sèche et humide, et mixte- HCO_3 après la recharge différée de la nappe en mi-saison sèche. Leur minéralisation est issue des processus naturels et anthropiques en fonction des sites et des saisons. Les eaux d'infiltration sont récentes et évaporées provenant à la fois du fractionnement isotopique à la surface du sol et lors du transfert dans la zone non saturée.

Aussi, les faciès sédimentaires des Niayes sont silteux à sablo-silteux au Sud, sableux très fins à fins au centre et Nord du secteur. Les eaux interstitielles sont plus minéralisées dans les stations versants par rapport aux stations centres et davantage en surface qu'en profondeur. La matière organique est riche en substances hydrocarbonés à Mboro, évoluée à Lompoul et minéralisée à Potou. Elle principalement issue de la production primaire et de l'activité bactérienne associés à différents processus biogéochimiques. A fine échelle, la Niaye de Mboro montre une forte minéralisation sur le versant, une station centre riche en matière organique, et une station bas-fond dépendante de la fluctuation de la nappe qui influence la chimie de ces eaux. Les flux d'échange de phosphore, majoritairement lié au fer, à l'interface eau-sédiment sont plus importants sur le versant et ceux de l'ammonium dans la station bas-fond. Ces zones humides sont caractéristiques d'une lagune littorale à Mboro, un marais saumâtre à salin saisonnier à Lompoul et une prairie humide à Potou arrosée par la nappe où se pratiquent des activités maraichères plus intenses sur les stations versants et que celles des centres. Ainsi, le mode de fonctionnement hydrogéochimique et sédimentaire des Niayes est hétérogène à l'échelle régionale du Littoral Nord.

Mots Clés : Zone Humide – Nappe – Zone non saturée – Hydrochimie - Géochimie - Recharge - Bilan hydrique - Isotopie - Matière Organique - Flux de nutriments - Littoral – Sénégal

ABSTRACT

Located in the western part of Senegal, the Littoral Nord, a coastal strip of 110 km which extends from Kayar to Saint Louis. It is characterized by a sudano-sahelian in the South to sahelian climate in the North and by a succession of dunes and depressions. These latter are wetlands locally called "Niayes" with strong agricultural potential. They are threatened by anthropogenic pressure, climate and environmental changes associated with the development of the mining sector. This thesis presents two main points of reflection: (i) to evaluate quantitatively and qualitatively the groundwater resources of the North Littoral, and its spatial and seasonal variability at the regional scale due to new constraints; (ii) understand the hydrogeochemical and sedimentary functioning of the Niayes ecosystem that characterizes this area at the local scale. The sampling strategy was carried out by piezometric, physico-chemical, chemical and geochemical monitoring of groundwater at 32 sites over four campaigns. At the local scale, three pilot sites, Mboro, Lompoul and Potou, were targeted respectively in the South, Center and North of the Great Coast.

The groundwater fluctuation shows a decreasing gradient of the resource from the South to the North and a significant increase during 2010 when the rainfall was over 400 mm from Mboro in Saint Louis. This groundwater has conductivities varying between 162 $\mu\text{s}/\text{cm}$ in the wet season to 3590 $\mu\text{s}/\text{cm}$ in the dry season. The generally acidic pH is due to a strong agricultural and industrial activity especially in the southern part. Recharge of the aquifer varies according to the sites and the environmental conditions with an average of 3 mm/year in the North to 44 mm/year in the South. This groundwater has four chemical families (Ca-SO₄, mixte-Cl/SO₄, Na-Cl, mixte-Cl et mixte-HCO₃) with Na-Cl predominance in dry and wet seasons and mixed-HCO₃ after deferred recharge in mid-dry season. Their mineralization is derived from natural and anthropogenic processes depending on the sites and the seasons. Groundwater are recent and evaporated comes from both isotopic fractionation at the soil surface and transfer to the unsaturated zone.

Also, Niayes sedimentary facies are silty to sandy silt in the South, fine sandy to fine in the center and North of the area. Interstitial waters are more mineralized in the slope of depression than in the central and lowland stations more on the surface than in the deep. The organic matter is rich in hydrocarbon substances in Mboro, evolved in Lompoul and mineralized in Potou. It is mainly derived from primary production and bacterial activity associated to various biogeochemical processes. On a fine scale, the Mboro wetlands shows a strong mineralization on the slope, a center station rich in organic matter, and a lowland station dependent on the groundwater table fluctuation which influencing the chemistry of this water. The phosphorus exchange flux, predominantly linked to iron, at the water-sediment interface are more important on the slope and ammonium flux in the lowland station. These wetlands are characteristic of a coastal lagoon at Mboro, a seasonal brackish to saline marsh in Lompoul and a wet prairie in Potou watered by the groundwater where more agricultural activities are practiced at the slope side station more than central and lowland stations. Thus, the hydrogeochemical and sedimentary functioning mode of these Niayes is heterogeneous according to regional scale of North Littoral.

Key Words: Wetland - Groundwater - Unsaturated zone - Hydrochemistry - Geochemistry - Recharge – Water Balance - Isotopy - Organic Matter - Nutrient flow – Littoral – Senegal



SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
PARTIE I : CONTEXTE DE L'ETUDE DU LITTORAL NORD AU SENEGAL	
CHAPITRE I : CADRE PHYSIQUE ET CONTEXTE CLIMATIQUE	5
CHAPITRE II : GEOMORPHOLOGIE ET HYDROGRAPHIE	20
CHAPITRE III : CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE.....	32
PARTIE II : MATERIELS ET METHODES	
CHAPITRE IV : DONNEES EXISTANTES ET COLLECTE DE DONNEES COMPLEMENTAIRES	55
CHAPITRE V : TECHNIQUES ANALYTIQUES	65
CHAPITRE VI : METHODES DE TRAITEMENT DES DONNEES	76
PARTIE III : EVALUATION QUANTITATIVE ET QUALITATIVE DE LA NAPPE DU LITTORAL NORD	
CHAPITRE VII : EVALUATION QUANTITATIVE DES EAUX SOUTERRAINES.....	86
CHAPITRE VIII : EVALUATION QUALITATIVE DES EAUX DU LITTORAL NORD.....	109
CHAPITRE IX : ORIGINE DE LA MINERALISATION ET PROCESSUS GEOCHIMIQUES DANS LA NAPPE DU LITTORAL NORD.....	133
PARTIE IV : FONCTIONNEMENT HYDRO-GEOCHIMIQUE ET SEDIMENTAIRE DE L'ECOSYSTEME DES NIAYES SUR LE LITTORAL NORD	
CHAPITRE X : ETUDE GRANULOMETRIQUE, MINERALOGIQUE ET GEOCHIMIQUE DES SEDIMENTS	155
CHAPITRE XI : CHIMIE ET GEOCHIMIE ISOTOPIQUE DES EAUX INTERSTITIELLES DE LA ZONE DES NIAYES	180
CHAPITRE XII : ETUDE DES PROCESSUS DE DEGRADATION ET ORIGINE DE LA MATIERE ORGANIQUE : APPLICATION A LA NIAYE DE MBORO.....	209
DISCUSSIONS	246
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	259
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	265
ANNEXES.....	XXV



INTRODUCTION

Les zones côtières sont soumises à plusieurs types de pressions aussi bien naturelles qu'anthropiques. Elles sont caractérisées par une forte croissance démographique du fait des nombreuses activités socio-économiques qui s'y déroulent occasionnant ainsi une forte demande en eau pour satisfaire les besoins.

Dans les pays soudano-sahéliens à sahéliens comme le Sénégal, les populations sont souvent confrontées aux problèmes d'approvisionnement en eau potable. Ceci est dû à la faible réalimentation de la nappe et à la raréfaction des eaux de surface (Gaye, 1990). De plus, la surexploitation des aquifères dans les zones côtières entraîne un déséquilibre du régime d'écoulement de la nappe qui se traduit par une avancée du biseau salé et une détérioration de la qualité chimique (Güler et *al.*, 2012, Zghibi et *al.*, 2013). Aussi, l'impact anthropique se manifeste dans un contexte de nappe libre peu profonde par le retour à la nappe des eaux usées (Helena, 2009). En effet, la croissance démographique depuis quelques décennies et son corollaire l'urbanisation accélérée associée à l'intensification de l'agriculture péri-urbaine et le développement des industries ont provoqué une augmentation considérable des débits extraits des aquifères urbains entraînant du coup une baisse des niveaux piézométriques, mais surtout une dégradation progressive de la qualité chimique des nappes liés à de nombreux rejets peu ou pas épurés.

Le secteur d'étude se localise dans la partie Nord-Ouest du Sénégal et s'étend de Kayar à Saint-Louis. Sa géomorphologie se caractérise par une succession de dunes et d'inter-dunes. Ces dernières localement appelés « Niayes » sont des zones dépressionnaires humides où la nappe est affleurante à sub-affleurante fournissant 80 % de la production horticole nationale.

La première étude réalisée sur le système aquifère de la moitié nord-occidentale du Sénégal par Michel (1956) répondait à un souci de réduire le déficit de distribution en eau de la population dakaroise, et aussi à approvisionner les villes environnantes de la côte nord. Les précédents travaux ont permis de comprendre la géologie et l'hydrogéologie de la zone (Puttalaz, 1962, Noël, 1978, Dieng, 1987, Pernel & Gageonnet, 1992), l'environnement des Niayes (Pereira & Barreto, 1962, Lezine, 1986, Fall, 1986, Fall, 1996), les processus de recharge (Tandia, 1990, Gaye, 1990, El faid, 1999), les prévisions de l'exploitation de la nappe à l'horizon 2025 (Faye, 1995) et l'hydrochimie (Kane, 1995).

La nappe du Littoral Nord est actuellement exploitée en moyenne à 115.000 m³/j. L'intérêt d'avoir choisi comme site d'étude le secteur du Littoral Nord est sa position stratégique du fait de sa proximité avec la mer et de la capitale Dakar qui ont occasionné un développement socio-économique rapide ainsi un impact sur les ressources en eau. Cette zone est aussi influencée par les variabilités climatiques, l'exploitation minière et agricole grandissante et le Fleuve

Sénégal au Nord qui en font un secteur vulnérable mettant en péril ses ressources naturelles. De plus, les Niayes, sols très fertiles qui produisent 80 % de la production horticole nationale sont aujourd'hui des écosystèmes vulnérables à causes de la pression anthropique. Ceci impacte sur la qualité chimique des eaux souterraines et la biodiversité du milieu.

Face à ces nouvelles contraintes démographiques, climatiques et environnementales, notre travail a donc pour objectif de réévaluer quantitativement et qualitativement la ressource en eaux souterraines du Littoral Nord, en mettant l'accent sur le fonctionnement Hydrogéochimique et sédimentaire de l'écosystème des Niayes qui caractérise et borde la façade Ouest du Littoral Nord.

L'intérêt et l'originalité de cette recherche sera donc l'étude comparative et la mise en relation du fonctionnement de trois zones humides représentatives du Littoral Nord en rapport avec la qualité des eaux souterraines.

La stratégie d'étude choisie est de travailler à deux échelles :

- une échelle régionale tout le long du Littoral Nord, pour (i) évaluer quantitativement et qualitativement la ressource en eaux souterraines, (ii) comprendre la variabilité spatiale et saisonnière et de l'hydrochimie de la nappe utilisée pour l'AEP et l'agriculture dans les Niayes
- une échelle locale des Niayes au niveau de Mboro (Sud), Lompoul (centre) et Potou (Nord) du Littoral Nord, pour (i) étudier les processus géochimiques (ii) comprendre le fonctionnement hydrogéochimique et sédimentaire de l'écosystème des Niayes ainsi que les processus de dégradation de la matière organique.

Ce travail de thèse de Doctorat a été réalisé dans le cadre d'une collaboration internationale entre les Universités de Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal) et Rouen (France).

Il a été financé pour les mobilités par la Coopération Française à travers le projet SCAC pour les trois premières années et le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, la quatrième année. Il a également bénéficié de l'appui de l'International Foundation for Science (IFS), du Service des Relations Internationales (SRI) et du projet SCALE FR 3137 CNRS de l'Université de Rouen pour les campagnes de terrain, l'achat d'équipements et les analyses d'échantillons.

Ce travail a bénéficié aussi de l'apport de différents laboratoires pour la partie analytique ; il s'agit des :

- Laboratoires d'Hydrochimie et de sédimentologie du département de Géologie pour le soutien logistique et des analyses physico-chimiques
- Laboratoires Mixte Morphodynamique Continentale et Côtière (M2C) Rouen/Caen pour les analyses chimiques, géochimiques, granulométriques et minéralogiques ;
- Laboratoire d'ECODIV EA 1293 de Rouen pour les analyses des éléments mineurs (Fe, Mn, Al)

- Laboratoire d'Ecophysiologie Végétale d'Agronomie et de nutrition de Caen (EVA) pour les analyses isotopiques du $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ sur les sols,
- Laboratoire d'Isotopie de Helmholtz Zentrum München pour les analyses des isotopes environnementaux des eaux ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ et $\delta^3\text{H}$)
- l'Institut des Sciences de la Terre d'Orléans (ISTO) pour les analyses de COP, IH, IO, Tmax, Tpeak S2 sur la matière organique des sols

Dans le cadre de cette thèse, des cours de renforcement de capacités ont été effectués sur les thématiques transversales à Rouen (Anglais, Propriété intellectuelle, Organisation et Management), à Dakar (gestion de projets) et spécifiques sur les Isotopes (Utah/USA, Nancy/France, Dakar/Sénégal), sur la Télédétection Radar (Marne la Vallée/France, Delft/Hollande, et sur les Imagerie satellitaires et SIG (CSE/Dakar), l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau et l'agriculture (Ghana). Certaines institutions comme la Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau (DGPPE), le Centre de Suivi Ecologique (CSE), la Société Nationale des Eaux du Sénégal (SONES), l'ANACIM ont contribué à l'acquisition des données existantes.

Ce présent mémoire est structuré en quatre parties comprenant différents chapitres :

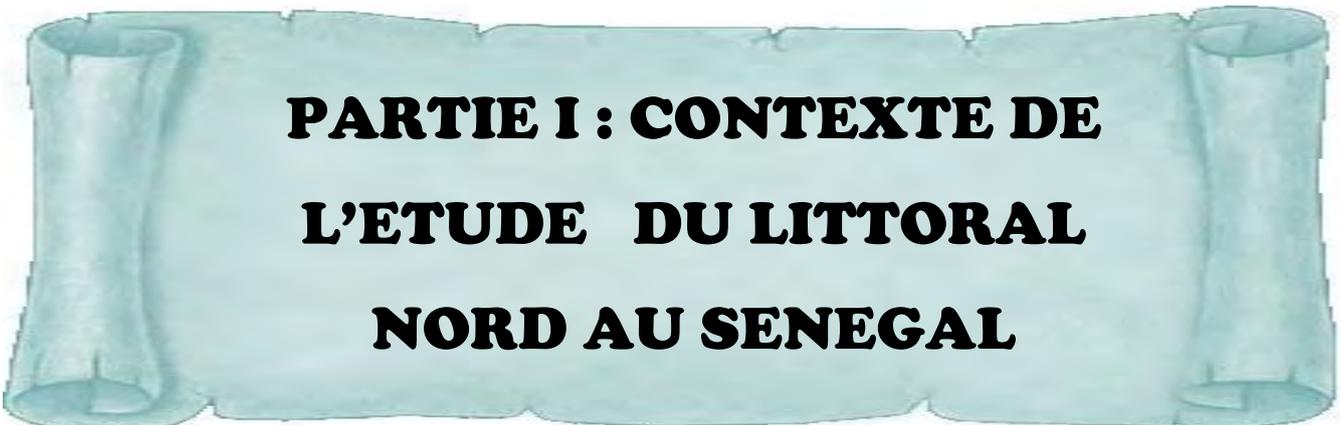
La partie I définit le cadre de l'étude et l'état des connaissances du secteur d'étude. Elle traite les contextes climatiques, géomorphologiques, géologiques et hydrogéologiques.

La partie II présente les matériels et méthodes utilisés. Elle expose plus particulièrement la stratégie d'investigation et les techniques expérimentales et analytiques mises en œuvre pour atteindre les objectifs escomptés.

La partie III étudie l'évaluation quantitative et qualitative des ressources en eau souterraine à l'échelle régionale du secteur du Littoral Nord du Sénégal. Elle est consacrée à l'étude de la fluctuation de la nappe à l'échelle pluri-décennale et saisonnière en relation avec les chroniques pluviométriques et de prélèvements. Elle traite également de l'évaluation spatio-saisonnière de l'hydrochimie des ions majeurs de la nappe à partir des outils géostatistiques. Dans cette partie, l'analyse des éléments mineurs, l'estimation de la salinisation et des processus de minéralisation ont permis aussi de caractériser cette nappe côtière. De plus, La détermination du taux recharge de la nappe a abouti à l'établissement du bilan hydrique à l'échelle locale des sites pilotes et régionale du secteur du Littoral Nord.

La partie IV met l'accent sur le fonctionnement hydrogéochimique et sédimentaire de l'écosystème des Niayes du Littoral Nord. Elle développe les caractéristiques granulométriques et minéralogiques des sédiments, la géochimie des sédiments particulièrement la teneur en eau et la matière organique, en quantité et en qualité le long de la Zone Non Saturée et en fonction des saisons au niveau des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou, afin de déterminer leur typologie. Un accent particulier a été mis sur la Niaye de Mboro pour comprendre les processus de

dégradation et l'origine de la matière organique, les formes de phosphores dans les sédiments, la quantification des flux de nutriments à l'interface eau-sédiment et la géochimie isotopique dans les eaux et les sédiments. Cette étude apportera des éléments qui aideront à la préservation des ressources.



**PARTIE I : CONTEXTE DE
L'ETUDE DU LITTORAL
NORD AU SENEGAL**

Chapitre I : Cadre physique et Contexte climatique

I.1. Localisation Géographique

La zone d'étude se localise dans la partie occidentale du Sénégal entre les latitudes 15° et 16°08' Nord et les longitudes 16°13' et 17°17' Ouest. Elle s'étend de Kayar à Saint Louis sur une bande de 110 Km de longueur et une largeur variant de 3 à 30 Km couvrant ainsi une superficie de 2 300 km² (Figure 1).

Elle est limitée à l'Ouest par l'Océan Atlantique, à l'Est par la route nationale Thiès-Saint-Louis. Elle est à cheval sur quatre régions administratives : Dakar au Sud-Ouest, Saint-Louis et Louga au Nord, et Thiès au sud.

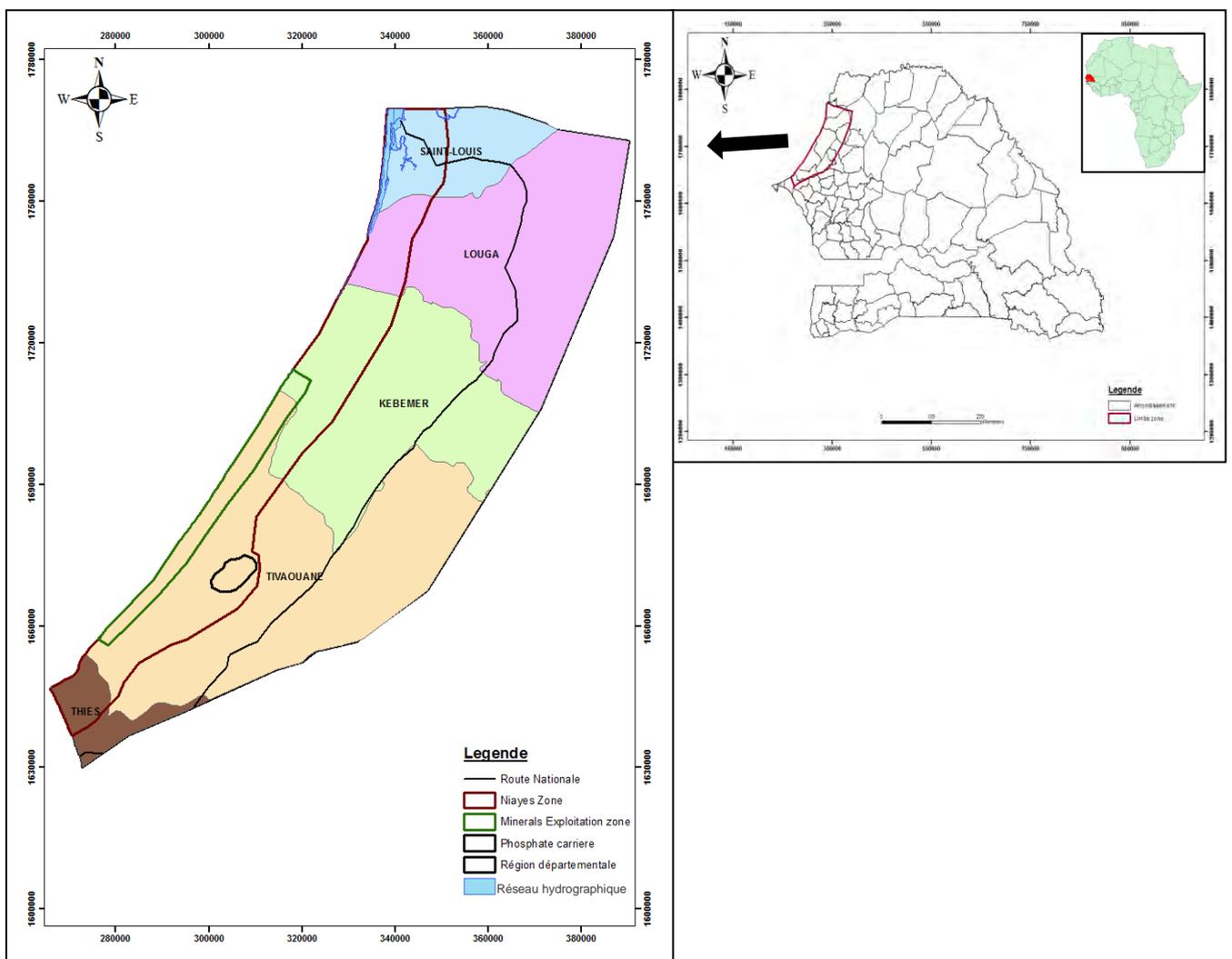


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

Les données de l'Agence Nationale de la Démographie du Sénégal (ANDS) montrent que la population des trois régions qui chevauchent la zone des « Niayes » a été estimée à 3 567 999 habitants en 2013 pour une population nationale de 13 508 715 habitants, soit 26,4 % de la

population totale. La figure 2 synthétise les données de l'ANDS de 1976, 1988, 2002 et 2013. Le récent recensement estime la population sénégalaise à 13 508 715 habitants dont 54,8 % de ruraux (ANDS, 2014). Les densités respectives de populations sont 5 739, 268, 35 et 47 habitants/Km pour les régions de Dakar, Thiès, Louga et Saint-Louis. Le tableau suivant montre l'évolution de chaque région de la zone de 1976 à 2015.

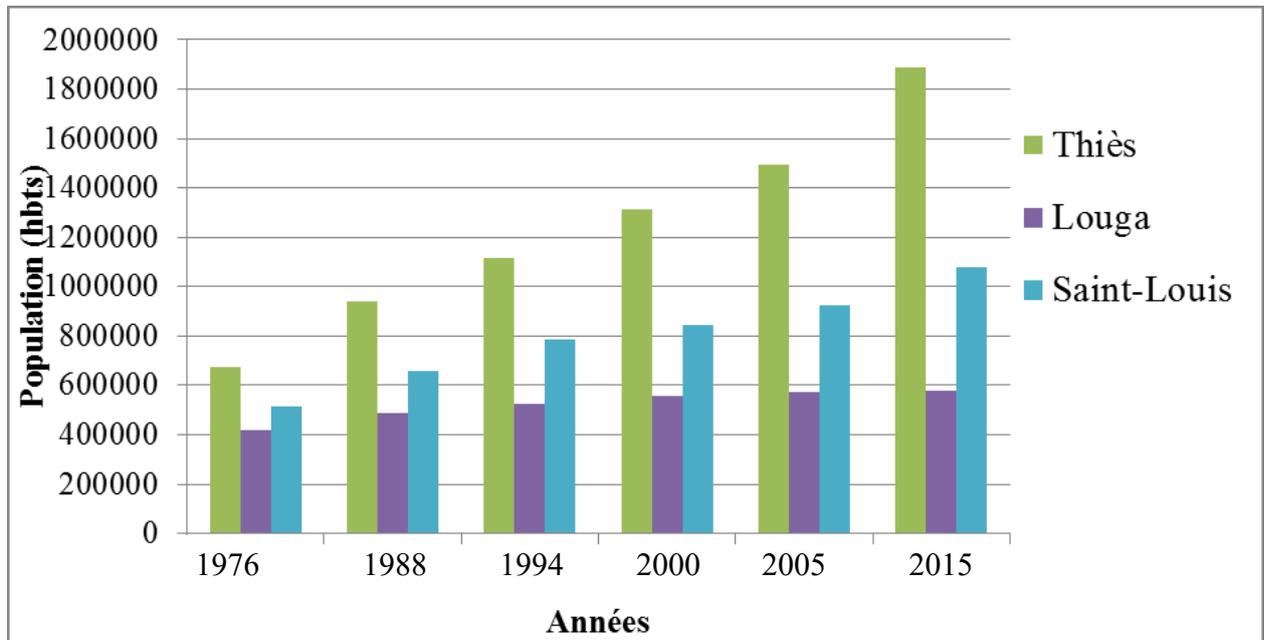


Figure 2 : Dynamique de la population dans les régions Thiès, Louga et Saint-Louis de la zone des Niayes de 1976 à 2015

En effet, la population de Louga a faiblement augmenté au cours de ces quatre décennies variant de 419 599 en 1976 à 578 100 habitants en 2015. Elle croît modérément à Saint-Louis atteignant le double de sa population de 1976 (541 735 habitants) en 2015 (1 078 800 habitants). La région de Thiès présente une croissance exponentielle de la population passant de 674 440 habitants à 1 889 300 habitants en 2015.

Par ailleurs, la comparaison avec les autres régions du pays montre que la zone des Niayes présente une forte concentration de population qui très certainement pourrait avoir des conséquences sur les conditions environnementales et socio-économiques du fait du développement des activités agricoles, pastorales et industrielles. Cette zone côtière est aussi attractive avec l'essor des activités touristiques et de pêche le long de la côte.

I.2. Contexte climatique

1.2.1. Climat

Le régime climatique du Sénégal occidental est régi par les courants anticycloniques liés à l'existence de zones de très hautes pressions :

- l'anticyclone des Açores de l'Atlantique nord, qui engendre les alizés maritimes soufflant de Novembre à Juin. A partir de Février, il se déplace vers les basses latitudes tropicales et est à l'origine d'alizés continentaux chauds et secs.
- l'anticyclone de Sainte Hélène de l'Atlantique sud dirige les alizés de sud-est qui engendrent la mousson, et apporte les pluies
- L'anticyclone de l'Afrique du Nord qui donne naissance à des vents chauds et secs (Harmattan) se manifeste de Février à Mai. Cependant, la frange côtière du littoral nord est plus ou moins protégée de celui-ci.

Le secteur d'étude qui appartient à la zone intertropicale semi-aride fait partie de la "région sahélienne" dont le régime subdésertique de transition avec un climat de type sahélo-saharien est caractérisé par une saison des pluies de trois mois (Juillet à Septembre) et une longue saison sèche (Novembre à Juin). Ce type de cycle saisonnier est déterminé par l'antagonisme du flux de l'alizé (air continental sahélien) et du flux de la mousson (air équatorial humide d'origine océanique) (Faye, 1995). La zone de convergence entre ces masses d'air constitue la Zone InterTropicale de Convergence (ZITC) dont la trace au sol représente le Front intertropical (FIT). La position et les déplacements de la ZITC sont particulièrement liés aux températures de surface qui conditionnent l'alternance régulière des deux saisons.

Les précipitations moyennes annuelles varient entre 200 mm au Nord et 500 mm au Sud avec une répartition inégale des hauteurs pluviométriques mensuelles et journalières au cours de l'année. La quantité maximale des pluies est centrée soit sur le mois d'Août, soit sur le mois de Septembre (Figure 3) lorsque le front intertropical (F.I.T) atteint sa position septentrionale extrême (Leroux, 1980). Ces mois les plus pluvieux reçoivent entre 55 et 65 % du total des précipitations interannuelles (Gaye, 1990). Au cours de la saison sèche, des précipitations appelées « Heug » peuvent survenir ; elles sont issues d'intrusion de masses d'air polaire, irrégulières et peu abondantes (Pereira-Barreto, 1962). Une diminution de la pluviométrie est observée de la zone Sud au Nord du pays. A ce gradient méridien, s'ajoute des nuances littorales avec des pluies plus abondantes sur la côte que vers l'intérieur du pays.

1.2.2. Pluviométrie

L'évolution de la pluviométrie inter-annuelle de 1930 à 2012 ? 2013 montre un cumul moyen de 556 et 366 mm respectivement pour les stations de Thiès et Louga par rapport aux moyennes respectives de 497,6 et 320,2 mm pour la période normale 1960-1990. Cette évolution présente une période généralement excédentaire de 1930 à 1970 intercalées de quelques années déficitaires comme 1941, 1949 et 1968. Elle est suivie généralement par une période déficitaire exceptée quelques années comme 1989, 1999, 2010.

La station synoptique de Saint-Louis montre un cumul moyen de pluie de 331 mm pour la période 1892-2014 et 299 mm de 1930 à 2014 par rapport à la normale de 1990-1960 où une moyenne de 259 mm est enregistrée. Cette station présente une période très excédentaire de 1892 à 1930 ponctués de quelques années sèches, puis faiblement excédentaire jusqu'en 1969 et enfin une période déficitaire de 1970 à 2014 à l'exception des années 1975, 2000, 2010, 2012 et 2013.

La dynamique de fluctuation de la pluviométrie par rapport à la moyenne (Figure 3) met en évidence une période excédentaire de 1930 à 1969 pour les stations à l'exception de l'année 1968. Une longue période largement déficitaire de 1970 à 2004 intercalée par des années excédentaires souvent d'index pluviométrique inférieure à 1.

Une pluviométrie moyenne à élevée est notée au Nord à Saint-Louis de 2004 à 2011 avec un pic de pluie en 2010 atteignant 587 mm, puis elle baisse drastiquement en 2014 à hauteur de 142 mm. Au cours de ces dernières années, les variations pluviométriques sont plus faibles à Thiès et Louga. Aussi, le calcul des moyennes mobiles sur 5 ans montre pour les trois stations des alternances de périodes humides et de périodes déficitaires très marquées après la grande sécheresse des années 1970. Il semble se dégager une certaine alternance de périodes sèches et humides, avec cependant une persistance de la sécheresse durant les deux dernières décennies, qui remet en cause toute notion de périodicité dans les éventuels cycles (Gaye, 1990).

D'une façon générale, le climat du Littoral nord est différent de celui du littoral sud et des régions intérieures du fait 1/ d'une part de la pénétration d'alizés inversés quelques dizaines de kilomètres vers l'intérieur, qui induit des températures plus faibles à la côte et qui remontent vers l'intérieur ; 2/ d'autre part cette région subit en fin de saison humide des passages de queues de dépressions de nord-ouest.

PARTIE I : CONTEXTE DE L'ETUDE DU LITTORAL NORD AU SENEGAL

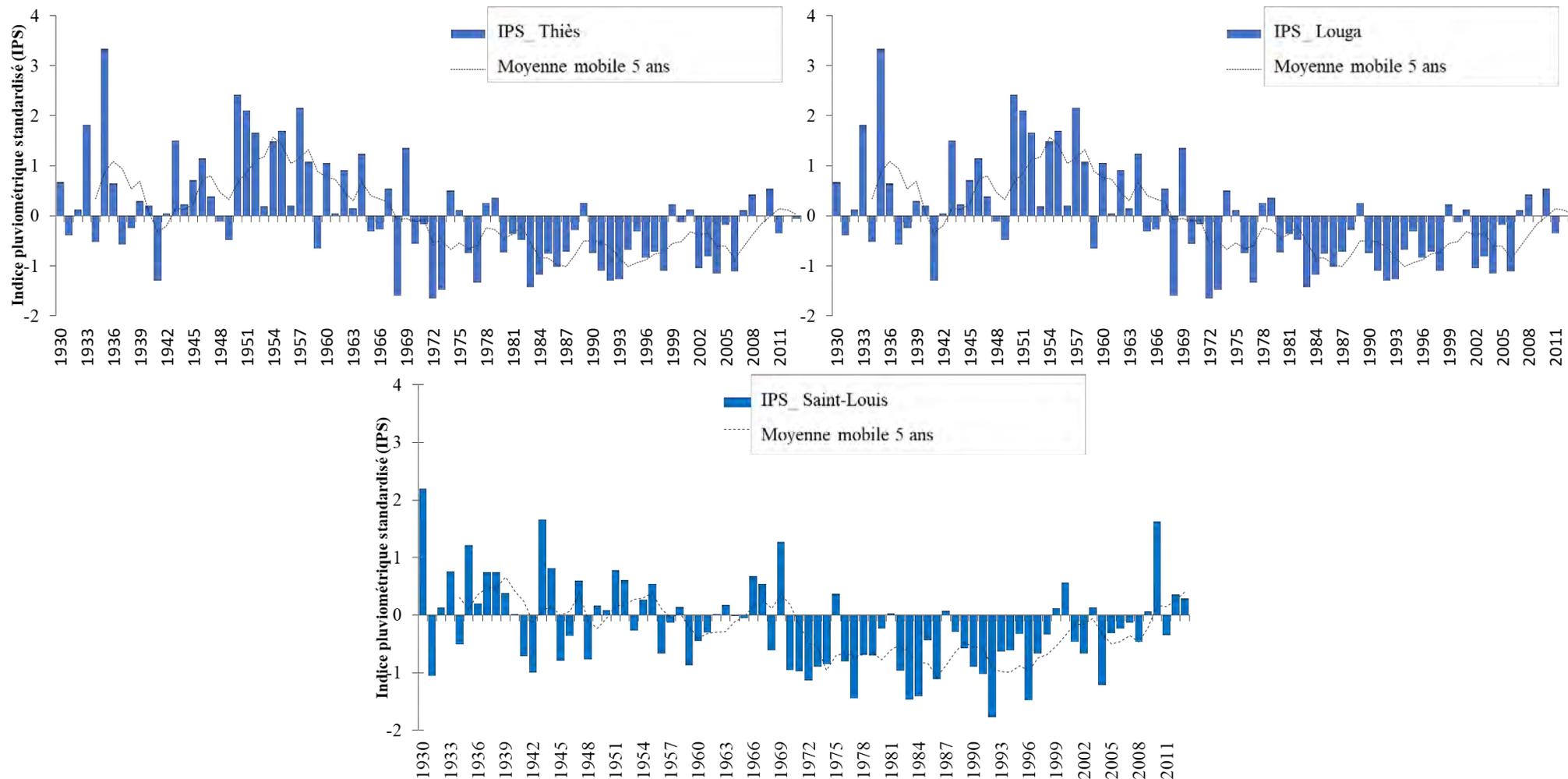


Figure 3 : Indice pluviométrique standardisé de 1930-2013 au niveau des stations climatiques de Thiès, Louga et Saint-Louis ainsi que leur moyenne mobile sur 5 ans en pointillé noir

La chronique de pluie de Saint-Louis qui remonte à la fin du 19^{ème} siècle indique une forte susceptibilité à recevoir des pluies abondantes en saison humide qui ont pu être très significatives sur le total annuel dans les périodes antérieures.

Par ailleurs, comparativement au reste de la région sahélienne, l'extrême ouest du Sénégal et le sud de la Mauritanie présentent des déficits persistants durant les années 90 et 2000.

L'évolution des pluies mensuelles montre un pic pluviométrique au mois d'Août pour les trois stations avec 222, 143 et 118 mm respectivement aux stations de Thiès, Louga et Saint-Louis de 1930 à 2013 (Figure 4)

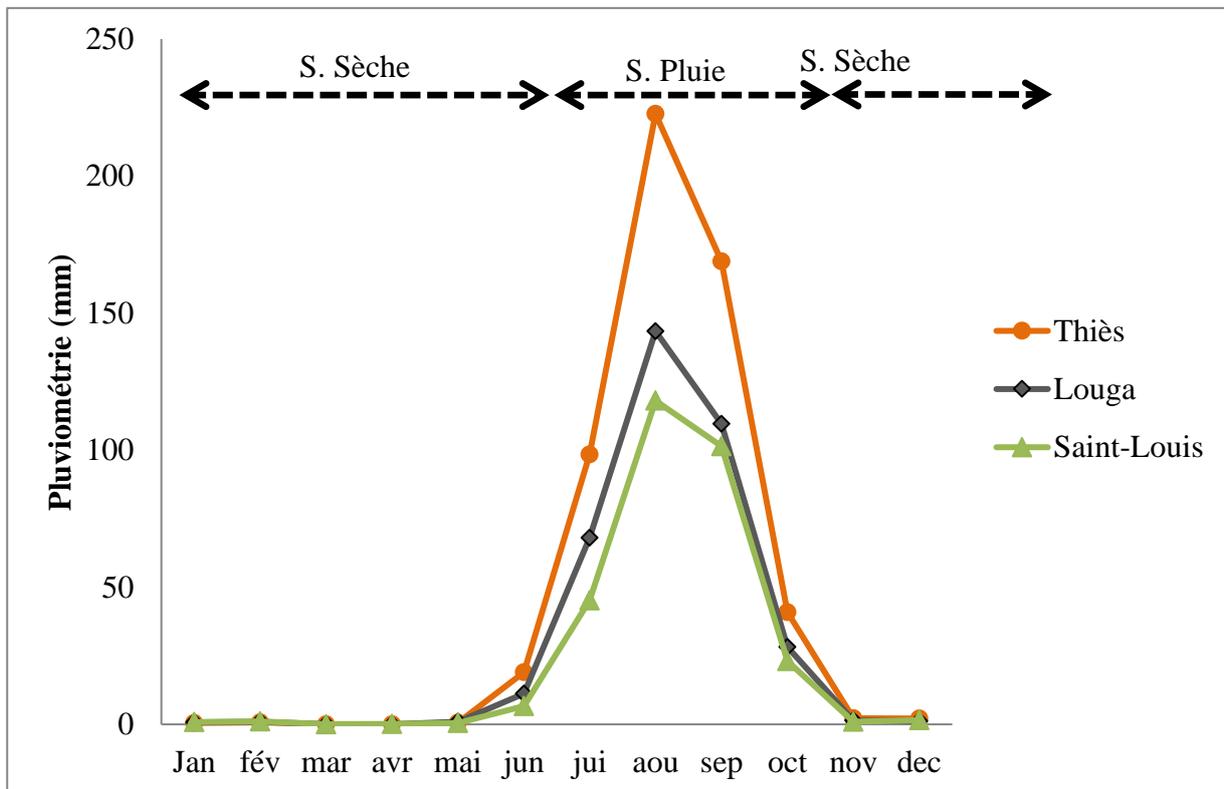


Figure 4 : Moyenne de pluviométrie mensuelle de 1930-2013 pour les stations pluviométriques de Thiès, Louga et Saint-Louis

Test d'homogénéité des séries pluviométriques chronologiques

Aussi, la détection des ruptures dans les séries pluviométriques a été réalisée à l'aide du logiciel Kronostat (IRD, 1998). Une rupture dans une série chronologique peut être assimilée à un changement dans la loi de probabilité de la série à un instant donné, le plus souvent inconnu. Il propose plusieurs tests statistiques de détection de ruptures. Nous avons pour cela utilisé les tests de Buishand et ellipse de Bois, et la segmentation de Hubert (Hubert et al., 1987).

Ces graphiques mettent en évidence une forte variabilité spatiale et temporelle des séries pluviométriques (Figure 5). En effet, les ellipses de Bois montrent une faible variabilité avant les années 1970 avec des valeurs généralement en dessous de l'intervalle de confiance de 90. Après, la grande sécheresse de 1970, la variabilité met en évidence des ruptures à l'intervalle de confiance de 99 %

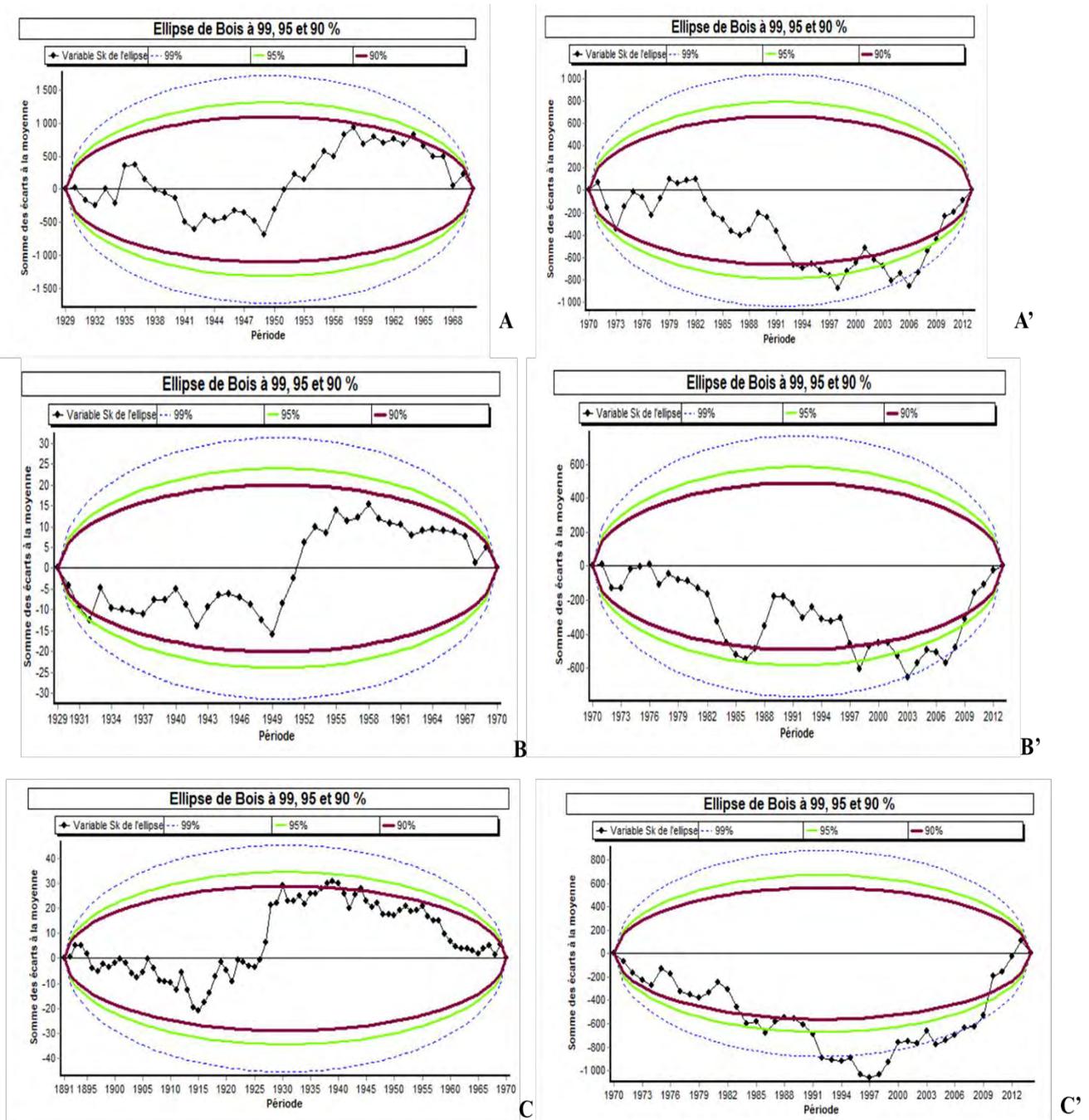


Figure 5 : Ellipse de Bois des séries pluviométriques avant et après la grande sécheresse de 1970 au niveau des stations climatiques Thiès (A-A'), Louga (B-B') et Saint-Louis (C-C')

principalement notée à partir de l'année 1997 pour les trois stations et fortement représentée à la station de Saint-Louis. L'année 1953 pour les stations de Louga et Thiès et 1929 à Saint-Louis.

Des ruptures climatiques sont aussi identifiées par la segmentation de Hubert avec des maximas (1225 ± 0 mm) en 1935, 749 ± 107 mm de 1950 à 1953 et 1139 ± 0 mm en 1928; et des minimas de 455 ± 135 mm de 1968 à 2013, 286 ± 90 mm de 1970 à 2013, 246 ± 102 mm de 1970 à 2014 respectivement à Thiès, Louga et Saint-Louis (Tableau 1).

Tableau 1 : Segmentation de Hubert des séries pluviométriques au niveaux des stations climatiques de Thiès, Louga et Saint-Louis

Station	Début	Fin	Moyenne (mm)	Ecart-type
Thiès	1930	1934	624	190
	1935	1935	1225	0
	1936	1967	669	184
	1968	2013	455	135
Louga	1930	1949	414	152
	1950	1953	749	107
	1954	1969	429	117
	1970	2013	286	90
Saint-Louis	1892	1927	385	164
	1928	1928	1139	0
	1929	1969	356	115
	1970	2014	246	102

Cette méthode met en évidence les séries pluviométriques caractéristiques au cours de la période de temps considérée et confirme ainsi les ruptures en 1970 pour les stations de Louga et Saint-Louis et 1968 à Thiès, de 1929 à Saint-Louis et de 1950 à Louga. On distingue ainsi une période de rupture généralisée au secteur de 1967 à 1970. Ces tests mettent en évidence une baisse importante des taux pluviométriques annuels depuis le début des années 1970. Cette diminution des précipitations a globalement entraîné l'amenuisement des ressources en eau (Bodian, 2014).

1.2.3. Températures

Les données de températures moyennes mensuelles sur la période de 1977-2013 sont présentées en Figure 6. Elles montrent au cours de l'année que les températures les plus élevées sont de

30°C à Louga et 29°C à Thiès et Saint-Louis. Ces pics au mois d'Octobre correspondent à la fin de la saison des pluies. Les températures les plus basses sont enregistrées en Janvier avec 23°C à Saint-Louis et 24°C à Louga et Thiès.

En outre, la station de Saint-Louis présente des températures plus basses par rapport à la station de Louga et cela s'explique par le fait que cette station est sous l'influence des alizés maritimes qui abaissent les températures. Toutefois, on note que les températures deviennent plus élevées à Saint-Louis en saison de pluie comparée à la région de Thiès. Ceci pourrait provenir de la faible insolation induit par l'ennuagement et la forte humidité relative à Saint-Louis comparée aux deux autres stations en saison humide.

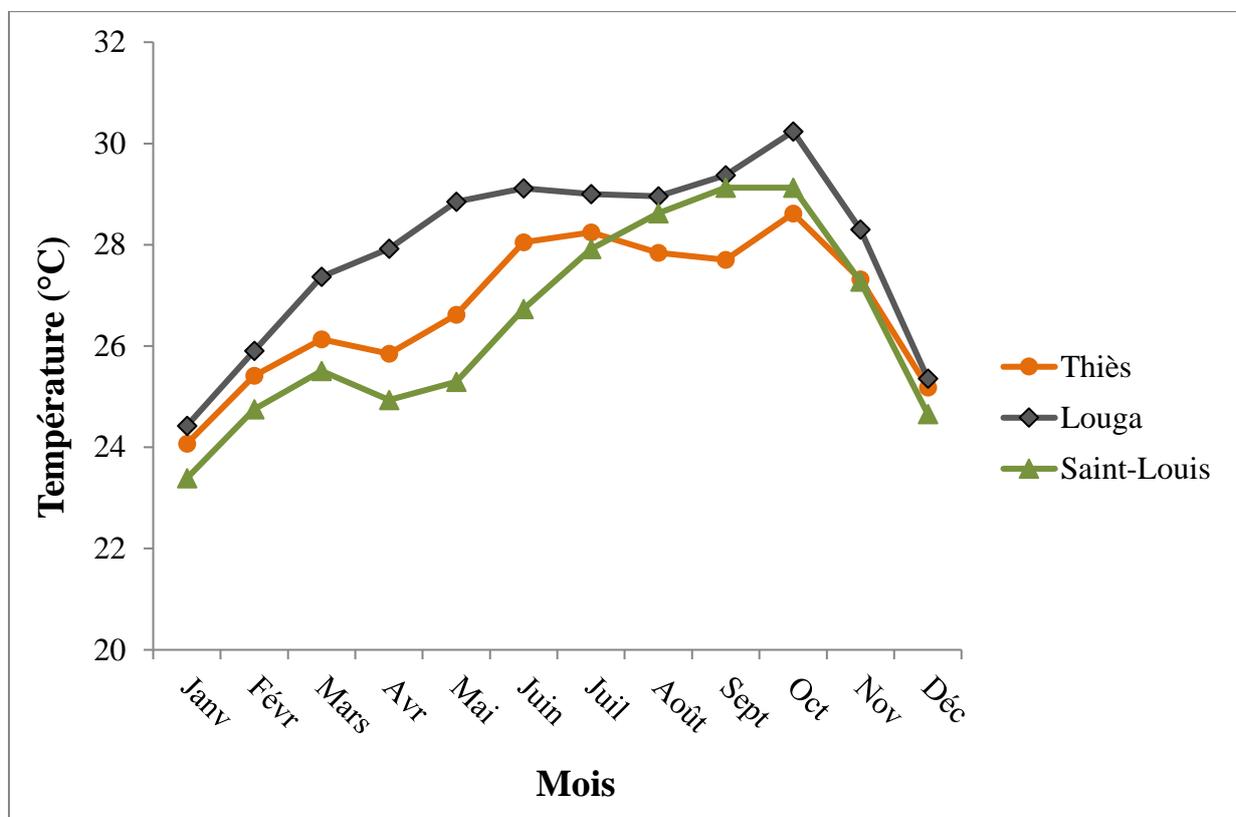


Figure 6 : Températures moyennes mensuelles de la période de 1977 à 2013 des stations de Thiès, Louga et Saint-Louis

1.2.4. Humidité relative

Les données mensuelles de l'humidité relative de 1977 à 2013 montrent des maxima de 79, 73 et 80% en Septembre et des minima de 48, 40 et 51 % en Janvier respectivement aux stations de Thiès, Louga et Saint-Louis (Figure 7) avec des valeurs moyennes de 63, 55 et 66%.

L'occurrence des pluies en Août et Septembre pourrait expliquer le maximum d'humidité relative enregistré durant les mois de Septembre et d'Août. Par contre, le minimum de Janvier et de Février (dans une moindre mesure de Décembre) s'expliquerait par la présence de vents peu chargés en humidité. Les taux d'humidité relative sont plus importants à Saint-Louis qu'à Louga et Thiès à cause la proximité de la mer de cette station.

Les stations de Thiès de Louga sont plus continentales que celle de Saint-Louis.

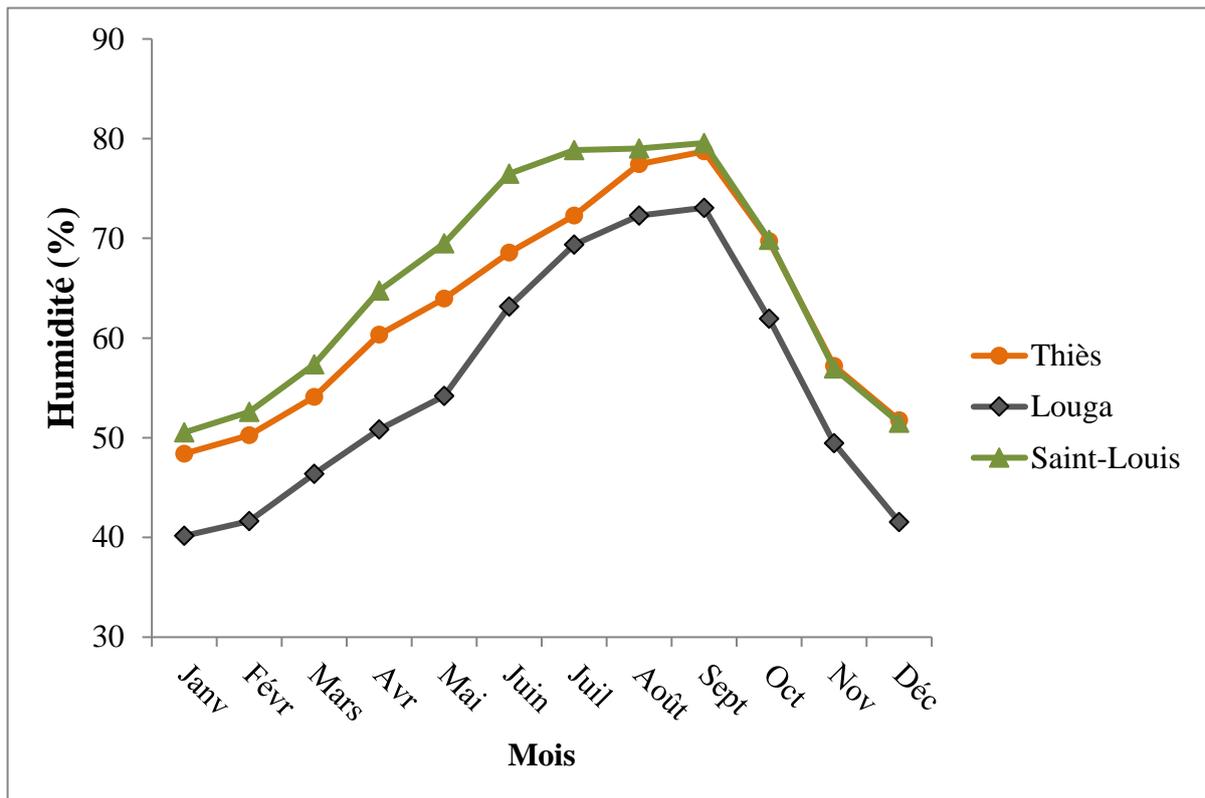


Figure 7 : Humidités moyennes mensuelles de la période de 1977 à 2013 des stations de Thiès, Louga et Saint-Louis

1.2.5. Vents

En zone côtière, les vents jouent un rôle important dans le transport sédimentaire à travers l'érosion éolienne pour la formation des côtes sableuses. Ils sont aussi les générateurs des vagues qui sont le moteur des courants qui arrivent sur le littoral. Le secteur d'étude est ainsi soumis aux vents d'Est chaud et sec issu de l'anticyclone saharo-lybien nommé Harmattan de direction NE-SW et aux alizés maritimes qui sont des vents frais, secs et chargés d'embruns de direction NNW-SSE issues de l'anticyclone des Açores. Ces vents soufflent surtout en saison

sèche particulièrement de Mars à Juin. La saison des pluies (Juillet à Octobre) est plutôt dominée par les vents de Mousson de secteur S-SW et chargée d'humidité.

Le régime des vents de la zone d'étude est surtout marqué par l'alizé maritime de direction NNW qui prédomine et réduisent énormément l'impact de l'harmattan ou la mousson, ce qui confère à la zone littorale un climat doux (Ba et *al.*, 2011).

L'analyse des données de vitesse mensuelle des vents montre que des valeurs plus fortes dans la zone Nord que dans la zone Sud sur la période de 1981 à 2013 (Figure 8). Les valeurs minimales se localisent à la station de Thiès 1,8 m/s et maximales à Saint-Louis avec 5,1 m/s. Les valeurs annuelles sont respectivement en saison sèche à 24, 29 et 37 m/s et en saison humide à 7, 8 et 11 m/s aux stations de Thiès, Louga et Saint-Louis.

La direction des vents est variable et dépend fortement des différences de pressions et des variations de la température. Ces vents présentent généralement des directions N à NE, N à NW et N à NNW.

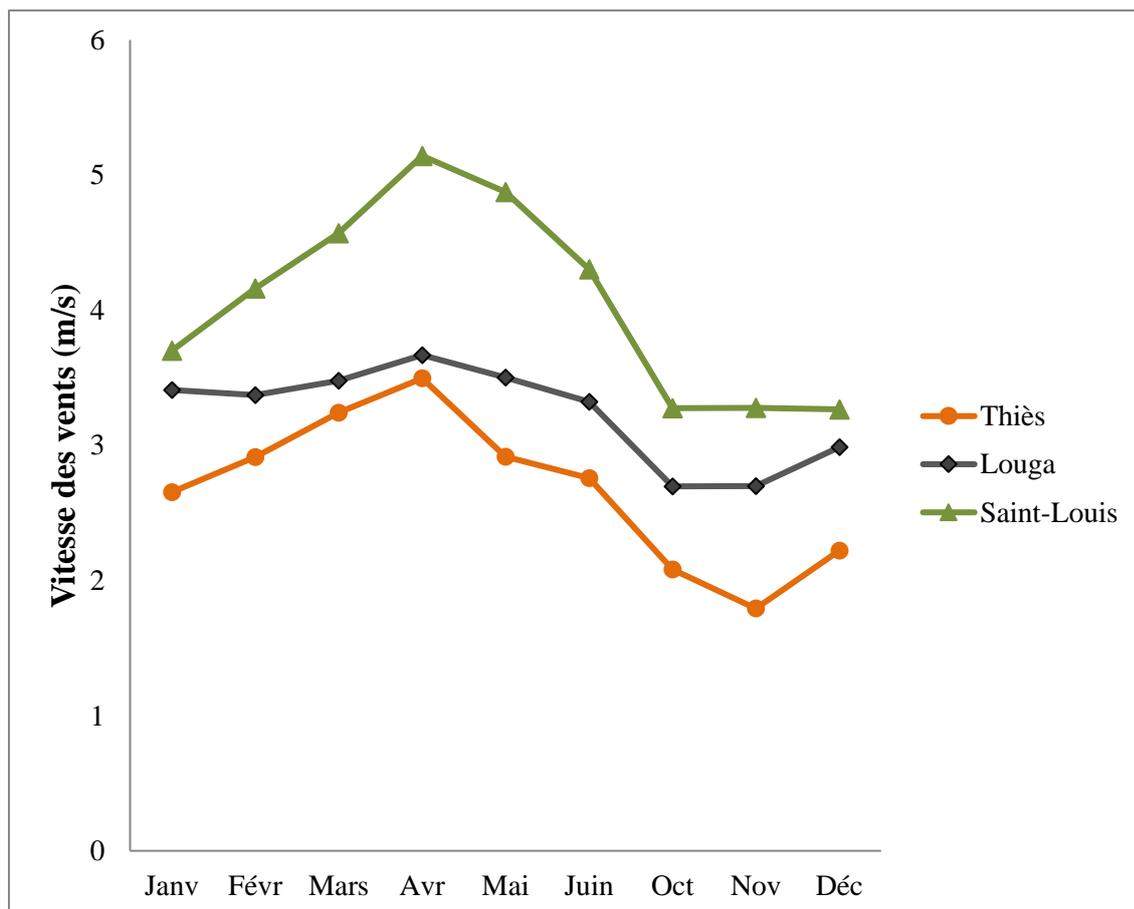


Figure 8 : Vitesse des vents mensuels moyennes de la période de 1977 à 2013 des stations de Thiès, Louga et Saint-Louis

1.2.6. Insolation

L'analyse de l'évolution mensuelle de l'insolation au niveau des trois stations met en évidence des valeurs plus élevées à Thiès dans la partie Sud en saison sèche cependant en saison de pluie la station de Louga au centre présente des valeurs importantes (Figure 9). Les plus fortes valeurs d'insolation sont enregistrées au mois d'Avril à Thiès 10 h/j, elle est un peu plus faible au niveau des stations à Louga et Saint-Louis (8,9 h/j). La plus faible insolation est notée au mois de Juin (6,2 h/j) à Saint-Louis. Les faibles valeurs d'insolation observées à la station de Saint-Louis comparées à celles des stations intérieures de Thiès et de Louga sont dus aux conditions de nébulosité dans cette partie Nord (Gaye, 1990). Les insolations moyennes sont de 8,6, 8,3 et 7,6 h/j sont enregistrées respectivement à Thiès, Louga et Saint-Louis de 1977 à 2013. Ce paramètre important est souvent utilisé dans l'estimation de l'évapotranspiration.

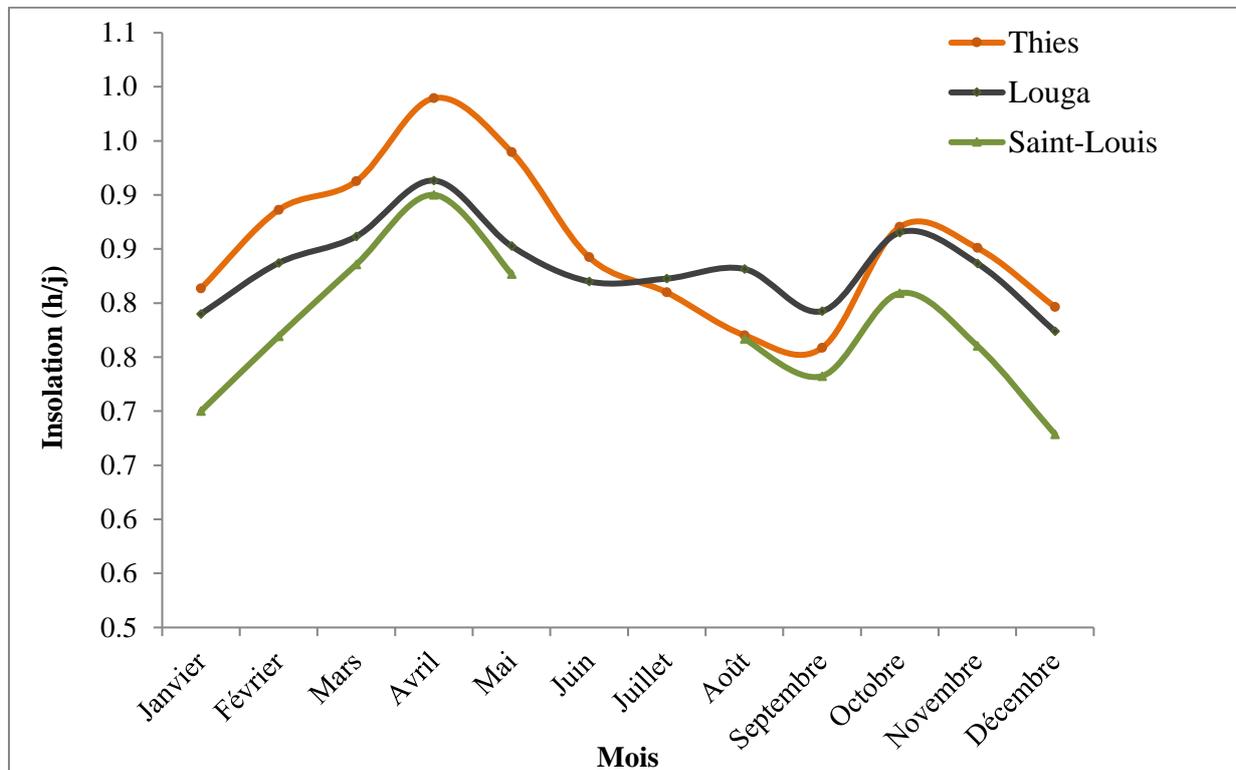


Figure 9 : Insolations moyennes mensuelles pour les stations de Thiès, Louga et Saint-Louis de 1977 à 2013

1.2.7. Evaporation et Evapotranspiration

❖ Evaporation

L'évaporation est mesurée à l'aide d'un évaporomètre de type Piche. Elle est plus prononcée en saison sèche qu'en saison de pluie. Les plus fortes valeurs sont enregistrées en Mars 11 - 5,7 mm et les plus faibles en Septembre 4,2 – 2,6 mm respectivement aux stations de Thiès et Saint-Louis (Figure 10). Le manque de données à Louga n'a pas permis la représentation de graphique pour cette station.

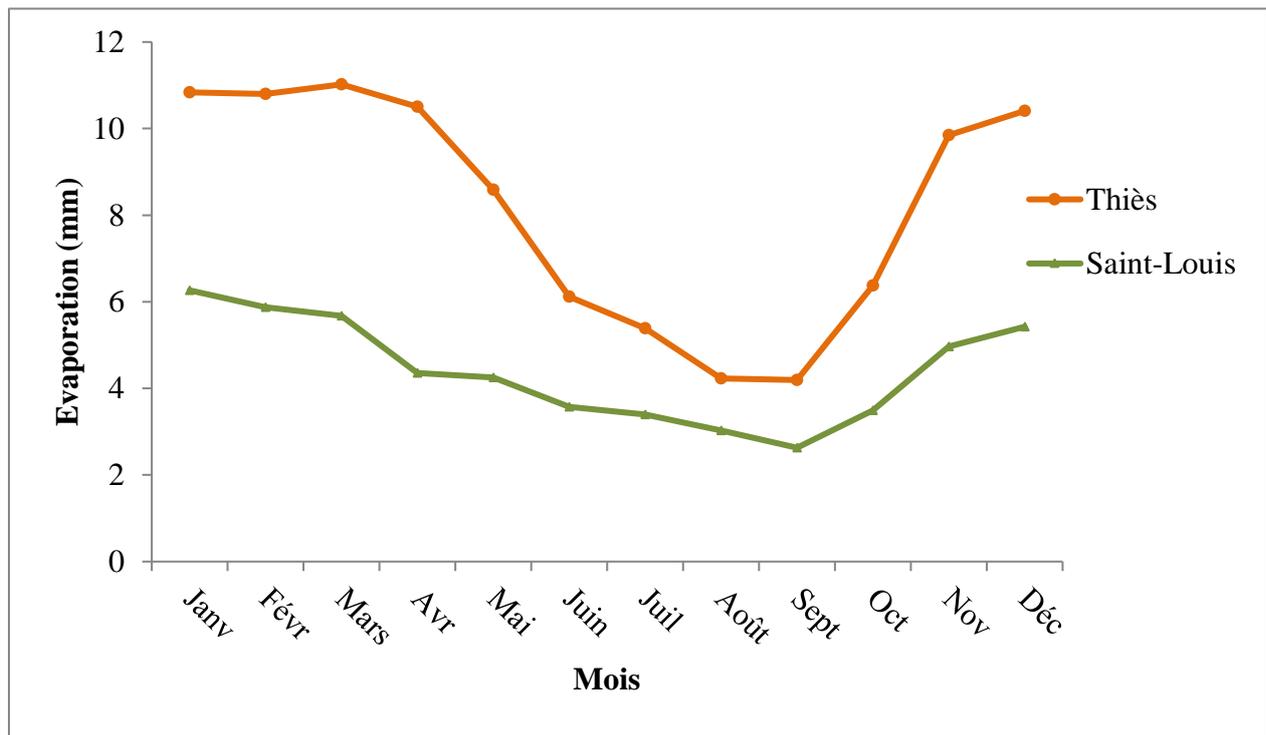


Figure 10 : Evaporation moyenne mensuelle de la période de 2000 à 2013 pour les stations de Thiès et Saint-Louis

❖ Evapotranspiration

L'évapotranspiration se définit comme le transport de l'eau depuis la surface du sol vers l'atmosphère représentant la somme de l'évaporation directe de l'eau du sol et la transpiration des végétaux. L'évapotranspiration réelle est très difficile voire impossible à déterminer directement du fait de la complexité du comportement biologique des végétaux et de la diversité des sols. L'évapotranspiration potentielle (ETP) constitue la valeur maximale que peut avoir l'évapotranspiration quand le sol atteint sa capacité de rétention maximum.

L'ETP peut se calculer par la formule de Turc (1961) :

- **ETP = K (Rg+50) (T/(T+15) (1+ (50-Hr/70))** **si Hr > 50%**
- **ETP = K (Rg + 50) (T/ (T+15))** **si Hr < 50%**

avec :

- K = 0,013*N, (N= nombre de jours de la période considérée),
- T = Température moyenne mesurée sous abri au cours de la période considérée (°C)
- Hr = humidité relative de l'air (%)
- Rg = radiation solaire globale (cal/cm2/jour) évaluée à partir de la durée d'insolation h
- $Rg = Iga (0,18 + 0,62 h/H)$
- h = durée de l'insolation (heure/jour)
- H = durée astronomique du jour (heure/jour)
- Iga = radiation solaire directe moyenne en l'absence de l'atmosphère (cal/cm2/jour)
- H et Iga varient en fonction de la latitude et sont données par les tables (Annexe 1)

Notons que le coefficient $(50-Hr) / 70$ est un facteur d'adaptation pris en compte dans les régions d'Afrique lorsque l'humidité relative est supérieure à 50%. (Dieng, 1987)

Une évaluation sur la période des dix dernières années montre que les moyennes annuelles d'ETP sont importantes durant les années 2007, 2008 et 2009 aux stations de Thiès et Louga avec des valeurs supérieures à 1700 mm (Figure 11).

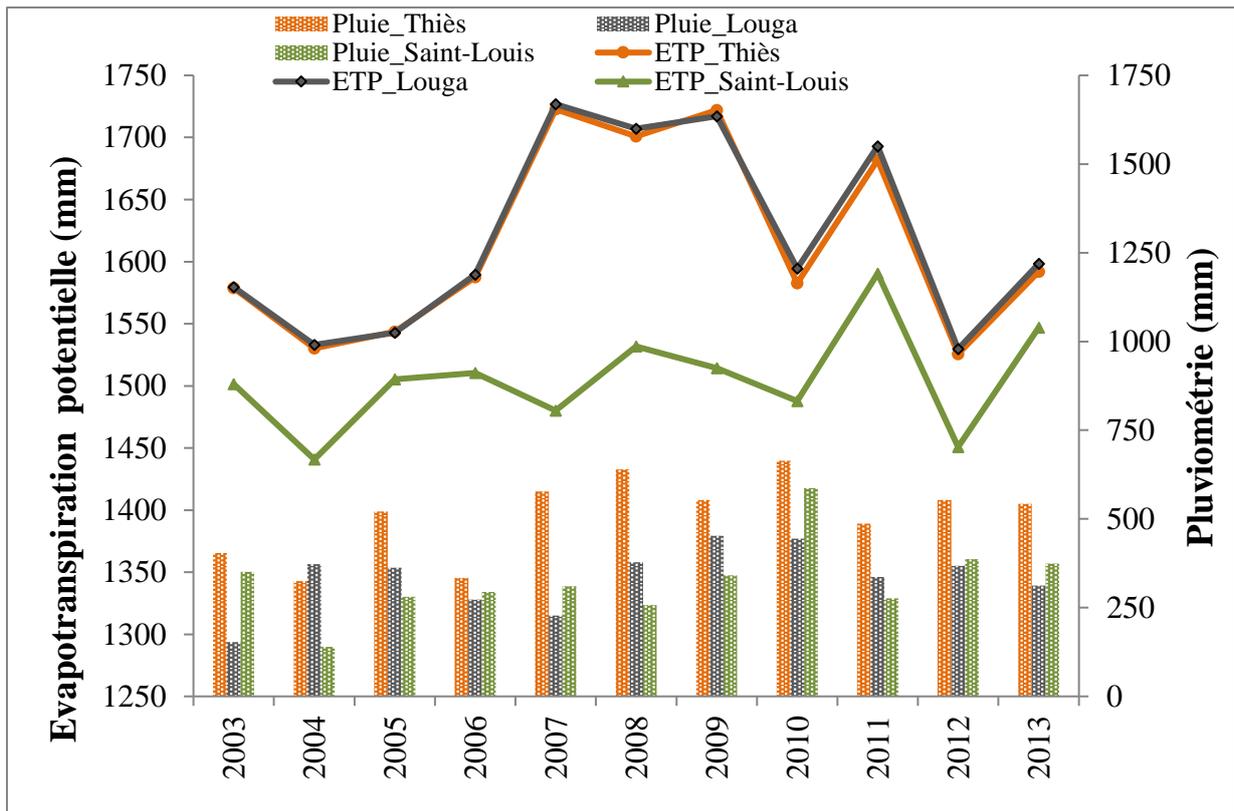


Figure 11 : Evapotranspiration potentielle (ETP) annuelle et pluviométrie de la période de 1981 à 2013 pour les stations de Thiès, Louga et Saint-Louis

Au cours de cette période, les valeurs d'ETP sont relativement similaires et plus fortes pour les stations de Thiès et Louga comparées à la station de Saint-Louis. Ces dernières se justifient bien par les valeurs d'évaporation et d'insolation plus faibles dans des conditions d'humidité relative plus élevée dans cette zone.

En conclusion, les facteurs climatiques ci-dessus décrits jouent un rôle essentiel dans le cycle hydrologique et plus particulièrement dans le secteur d'étude où la nappe est superficielle. Leurs variabilités par rapport au temps et à l'espace ont certainement des effets variables suivant les zones et en particulier sur la recharge de la nappe. Cette dernière sera abordée dans le cadre de ce travail par différentes méthodes décrites dans la partie III. Toutefois, l'approche bilantaire à l'échelle annuelle présentée à la Figure 11 indique bien un déficit et les faibles probabilités de la nappe à se recharger du fait des fortes valeurs d'évapotranspiration.

Chapitre II : Géomorphologie et hydrographie

II.1. Système dunaire

II.1.1. Morphologie des formations dunaires

Ces formations constituent des dunes littorales, localisées de Saint-Louis à Kayar, issues l'accumulation et du transport des sables. Ces phénomènes se font par l'action combinée de la dérive littorale d'orientation NNE-SSW et des alizés maritimes qui amoncellent le sable en dunes et les font progresser dans la direction SSE. Les quantités de sables mobilisés par cette dérive sur la côte Nord sont évaluées annuellement entre 600 000 et 1 500 000 m³/an (Barusseau, 1980; Pinson-Mouillot, 1980, Diaw, 1997, Bâ et *al.*, 2011).

Le système dunaire du littoral Nord comprend d'une part des dunes externes semi-fixées et vives; et d'autre part des dunes rouges fixées d'âge Ogolien.

Les dunes externes semi-fixées et vives sont encore appelées cordon dunaire littoral. Ce sont des dépôts quaternaires subactuels et actuels situés à proximité du littoral qui comprennent deux ensembles dunaires juxtaposés : les dunes vives blanches du cordon littoral et les dunes semi-fixées jaunes qui bordent le système ogolien remanié. Trois sous-ensembles se distinguent (Figure 12):

(i) les dunes vives récentes, près des rivages, formant une bande large de quelques mètres à quelques centaines de mètres, sont de couleur blanche et d'orientation résultant de l'action des alizés maritimes (NNW). Elles continuent à se former à partir de la plage, nourries par les apports de la dérive littorale. Cette bande de dunes blanches présente une morphologie assez complexe. Au niveau de l'arrière plage, les dunes s'amoncellent à l'action éolienne relativement intense et les contrastes altitudinaux se distinguent bien. Par contre, vers l'intérieur, le raccordement avec les dunes jaunes se fait généralement en pente douce.

L'estran est battu par une houle dont l'action engendre un transport de matériaux sableux qui engraisse continuellement le cordon littoral. Le volume charrié est estimé pour la côte nord entre 200 et 450 m/an (Barusseau, 1980).

(ii) les dunes jaunes semi-fixées s'étendent sur tout le long du littoral (Figure 12) sur une largeur pouvant aller jusqu'à 3 km (Michel, 1956). Le relief émoussé et passablement détruit reste encore vigoureux. Le modelé dunaire, très irrégulier, présente aussi les altitudes pouvant atteindre 10 à 20 mètres. Ces dunes ont une extension variable et la largeur du massif dunaire atteint 4 500 m dans certains secteurs tandis qu'elles se rétrécissent considérablement à l'aval de certaines grandes dépressions telle que celle de Mboro. Les versants sous le vent

surplombent l'erg ogolien par un talus abrupt qui devient très marqué lorsque le massif dunaire ceinture une dépression. Dans certains endroits (Ouest de Mboro, Diogo), le massif de dunes jaunes connaît des réactivations intenses tendant à ensevelir les dépressions.

(iii) les dunes jaunes ravivées issues de dunes jaunes en grande partie fixées par la végétation ont tendance à être remaniées et reprises en dunes vives. Elles s'élèvent parfois à plus de 30 mètres et sont situées près des Niayes et des cordons de dunes rouges.

Les dunes rouges fixées d'âge Ogolien situées plus à l'intérieur du continent (Tricart, 1965) sont disposées sur une bande large de plus de 3 km au Nord. Ces modelés dunaires sont très émoussés au fur et à mesure qu'on pénètre vers l'intérieur, Ceci peut être dû à la fois au décapage des crêtes des dunes et au colmatage des inter-dunes. Ces dunes ogoliennes présentent des altitudes relativement importantes pouvant atteindre 20 à 30 mètres dans les secteurs de Mboro et Diogo. Les alignements dunaires sont très irréguliers et serrés d'orientation NW et NE ou franchement E (Fall, 1986).

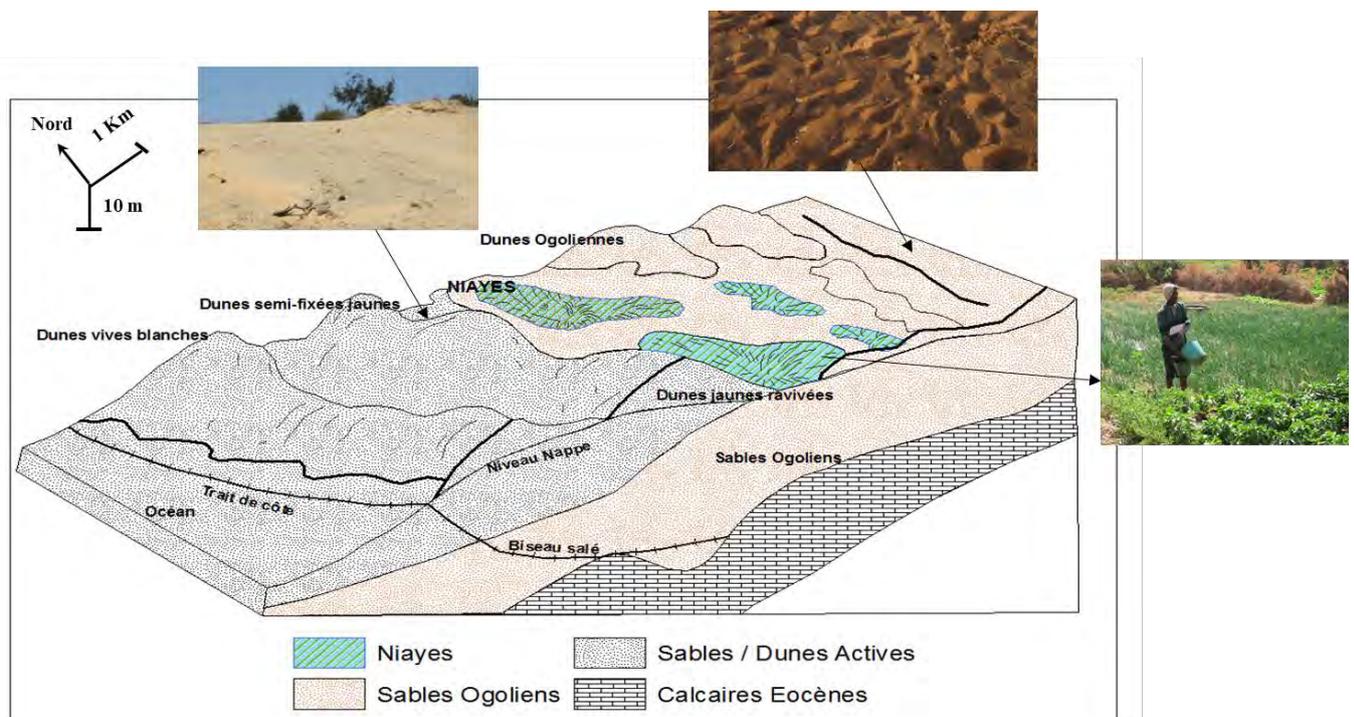


Figure 12 : Coupe structurale de la région des Niayes modifiée (BRGM, 1984)

II.1.2. Morphologie du plateau continental nord

❖ La bathymétrie

L'étude bathymétrique faite par Ruffman et *al.* (1977) montre de nombreuses ruptures de pentes. Ces accidents matérialisent des fosses dont les plus marquées sont localisées au droit

des localités de Kayar (canyon de Kayar), de Mboro (canyon Djoloff) et Lompoul (Canyon Peul) (Figure 13). L'isobathe - 200 m s'en éloigne progressivement à mesure qu'on remonte vers la vallée du Sénégal. Cela traduit un élargissement progressif de la plate-forme continentale du Sud vers le Nord.

❖ **Les reliefs structuraux**

Outre les fosses qui affectent les rebords du talus, le plateau continental est affecté de petits reliefs longitudinaux qui correspondent à des bancs rocheux parallèles à la côte. Ces bancs sont rencontrés en affleurements discontinus dans le secteur de Kayar-Mboro, et en affleurements continus dans le secteur Lompoul-Saint Louis.

❖ **La couverture sédimentaire**

La couverture sédimentaire du plateau Continental Nord est constituée de sables, sables vaseux et vases plus ou moins carbonatés. Les ensembles sableux et sablo-vaseux ont été mis en place principalement au Pléistocène supérieur (Inchirien et Ogolien) au cours des phases de retrait de la mer. L'humidification du climat à l'Holocène moyen a engendré la formation de vasières sur le proche plateau continental. Dans la région du Mboro, des niveaux de tourbes et de vases organiques datés de 9 500 à 12 000 ans B.P. ont été rencontrés dans les formations sableuses et sablo-vaseuses (Pinson-Mouillot, 1980).

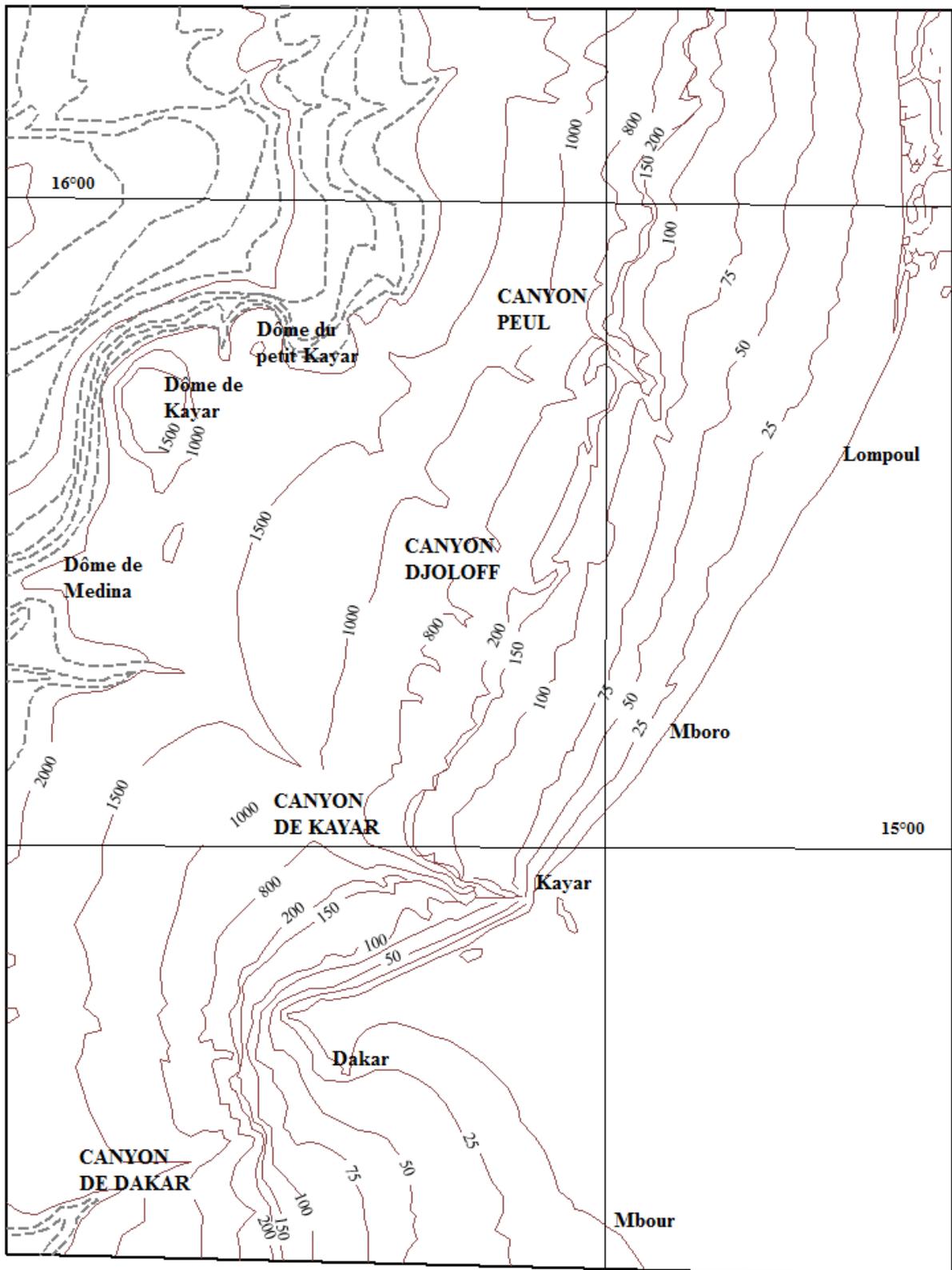


Figure 13 : Carte bathymétrique modifiée (Ruffman et al., 1977)

II.2. Zones humides dépressionnaires : Les Niayes

Les « Niayes » sont des dépressions plus ou moins inondées, permanentes ou semi-permanentes, qui s'étendent à une faible distance de la côte entre des dunes d'origine diverses (Puttalaz, 1962). Elles correspondent à des affleurements ou des émergences de la nappe phréatique dans les parties les plus basses des dépressions inter-dunaires et/ou d'un ancien réseau hydrographique qui a été plus ou moins comblé par des sables dunaires. Elles ont des formes et dimensions très variables (Michel, 1956). On distingue schématiquement deux types:

- des Niayes de petites dimensions qui correspondent à des émergences de la nappe phréatique dans les inter-dunes les plus profondes. La plupart de ces dépressions sont orientées NNW-SSE, selon la direction des dunes ogoliennes remaniées ;
- des Niayes de superficies beaucoup plus vastes, qui peuvent pénétrer loin vers l'intérieur des terres, recoupant une partie importante des cordons des dunes rouges.

Les Niayes s'inscrivent administrativement dans les quatre régions bordant la frange maritime du nord du pays: Dakar, Thiès, Louga et Saint-Louis (cf Figure 1). Elles s'étirent sur une longueur de 180 km, et sa largeur varie de 5 à 30 km à l'intérieur des terres et constitue un écosystème caractérisé par des dépressions en forme de lambeaux souvent inondées par l'affleurement de la nappe phréatique. Ces Niayes se distinguent par un micro-climat moins chaud avec la proximité de la mer et renferme 80 % de la production horticole nationale.

II.3. Hydrographie

Le réseau hydrographique est composé du fleuve Sénégal au Nord et de quelques mares permanentes dans la zone Sud de Mboro et des mares temporaires plus ou moins inondées en fonction des saisons dans les dépressions le long de côte. La limite Sud du secteur se situe à l'arrière du du Lac Tanma (cf Figure 31).

Les Niayes laissent entrevoir par leur morphologie l'existence d'anciennes vallées fluviales endoréiques perpendiculaires à la côte qui se sont pour la plupart asséchés du fait des conditions climatiques arides. Les ressources en eau dans ces zones humides proviennent donc essentiellement de la nappe phréatique des sables quaternaires qui caractérisent ce milieu. Cette hydrographie est influencée par la pluviométrie, la géomorphologie, une bonne perméabilité des sables et un régime hydrologique variable d'une zone humide à une autre (Fall, 1986; Kane, 1995).

II.4. Sols

La zone d'étude comporte trois principaux types de sols que sont les sols ferrugineux tropicaux, les sols peu évolués d'apport et les sols hydromorphes avec différentes variantes (Figure 14).

II.4.1. Sols ferrugineux tropicaux

Les sols ferrugineux tropicaux peu ou pas lessivés ou encore appelés sols "Dior" sont des sols peu évolués rouges ou beiges, à hydroxydes de fer, pauvres en matière organique. Ils recouvrent les dunes ogoliennes fixées et boisées. Ils sont caractérisés par un important lessivage du fer (Milot, 1964, Duchaufour, 1972) et la présence d'horizons rouge-vif en profondeur (Charreau et *al.*, 1965). Les sols Dior sont essentiellement sableux (Maignien, 1965) et couvrent dans la région d'étude une superficie relativement importante. On les retrouve aussi au niveau des sables argileux et grés du "Continental terminal".

Les sols sur sable dunaire en profondeur, bien drainés, perméables et faiblement structurés sont des sols à très faibles teneurs en argiles.

Les sols dérivés du Continental terminal sont au contraire généralement peu épais et recouvrent à faible profondeur une cuirasse ferrugineuse (Gaye, 1990). Ces sols qui sont localisés au Nord Est renferment aussi les sols bruns rouge sub-arides dû au caractère ferrugineux.

II.4.2. Sols minéraux peu évolués

Les sols minéraux recouvrent les dunes vives ou semi-fixées du littoral. Ce sont des sols pauvres en matières organiques notamment à Lompoul où ils sont de couleur jaune-ocre faiblement minéralisé en ilménite (Hébrard, 1958). Ces sols sont généralement des sols de minéraux brut à l'Ouest proche du rivage.

II.4.3. Sols hydromorphes

Leur développement dépend essentiellement des variations saisonnières de la nappe phréatique et de l'importance de la production végétale dans les dépressions qui déterminent l'apport de matière organique. Les sols organiques se répartissent en deux types principaux (Fall, 1986):

- les sols humifères à hydromorphie partielle qui se forment sur les bordures des dépressions tourbeuses, ou à l'intérieur de certaines dépressions non tourbeuses;
- les sols organiques semi-tourbeux ou tourbeux à hydromorphie totale, temporaire ou permanente qui se forment dans les tourbières.

Ces sols sont localisés à l'arrière des dunes littorales qui longent la côte dans les dépressions inter-dunaires humides.

La désignation de tourbière correspond à une zone humide caractérisée par l'accumulation progressive de la tourbe, elle se distingue par sa très forte teneur en matière organique, peu ou pas décomposée, d'origine végétale. C'est donc un écosystème spécifique et fragile dont les particularités en font, malgré des émissions de méthane, un puits de carbone vu qu'il y a plus de synthèse que de dégradation de la matière organique. Dans le secteur, il se distingue des sols tourbeux particulièrement dans la zone Sud de Mboro à Lompoul. D'après les travaux de Fall (1986), l'origine de la sédimentation des tourbes ligneuses et des vases organiques provient de l'accumulation du matériel organique (sédiments tourbeux) dans les cuvettes inter-dunaires et les paléo-vallées du massif des dunes ogoliennes depuis le Pléistocène supérieur jusqu'à une époque récente.

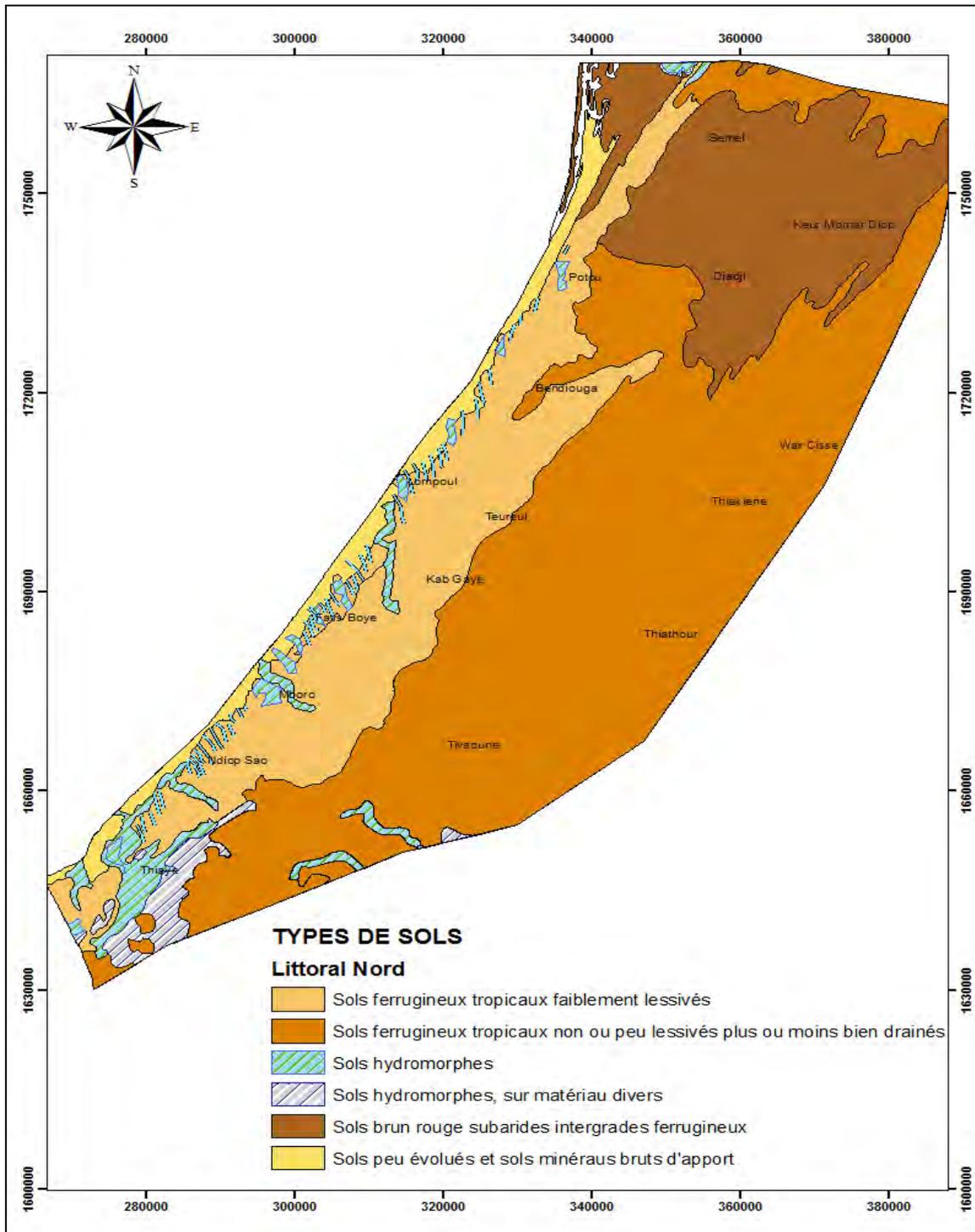


Figure 14 : Typologie des sols modifiée (USAID, 1986)

Le développement et la conservation de ces sédiments tourbeux dépendent essentiellement de facteurs climatiques (périodes pluvieuses du Quaternaire), hydrogéologiques (position du niveau de la nappe des sables) et géomorphologiques (formation de réceptacles stables dans le massif dunaire). Cette sédimentation est ainsi un mélange binaire entre une composante

biogénique autochtone liée à l'importance de la production végétale des réceptacles et une composante "terrigène" allochtone qui constitue la contribution de l'environnement inorganique.

A côté de ses sols hydromorphes, il peut se développer des sols halomorphes. Ce sont des sols légèrement ou franchement salés qui se forment principalement dans le delta du Sénégal et dans certains lacs côtiers tel que Tanma (Fall, 1986) au Sud-Ouest du secteur d'étude.

II.5. Végétation

La zone d'étude est caractérisée par un contraste remarquable avec à l'Ouest les Niayes où la végétation est luxuriante et à l'Est les terres agricoles.

La partie Ouest est constituée d'une grande variété d'espèces avec même parfois une forêt sempervirente (Stancioff, Staljansens, 1986). Les essences de cette forêt sont des espèces « à feuillage persistant ». On retrouve dans les Niayes des espèces fruitières forestières (*Mangifera indica*) et des palmeraies à huile (*Elaeis guineensis*). La diversité végétale et les sols hydromorphes dans les dépressions, sont en étroite relation avec la nappe phréatique. Ce contexte favorable fait que les Niayes représentent un environnement complexe, riche sur le plan floristique, comprenant de nombreuses espèces reliques des régions soudanaises et sub-guinéennes (Trochain, 1940; Raynal, 1961). Cependant, il est observé actuellement une disparition quasi-totale des espèces naturelles du fait de la progression des cultures maraîchères. La végétation à l'Est se résume à une pseudo-steppe arbustive relativement pauvre. Cette formation découle de la nature du sol (sableux et peu fertile), du surpâturage et du déboisement. La couverture végétale est caractérisée par un peuplement arboré et arbustif clair, typique de la zone sahélo-saharienne, avec dominance d'espèces tels que *Acacia radiana*, *Balanites aegyptiaca*, *Boscia senegalensis*. Le tapis herbeux est formé généralement de graminées, disparaît en grande partie en fin de saison sèche pour se régénérer après les premières pluies.

II.5.1. Végétation de système dunaire

Plusieurs faciès et groupements successifs de la couverture végétale ont été défini de la côte vers l'intérieur avec un faciès halophile, un groupement steppique et un groupement continental parsemé d'arbustes buissonnants et d'arbres (Trochain, 1940)

Le système de dunes jaunes et de dunes blanches présente une végétation quasi-inexistante tandis que les dunes vives ou semi-fixées ont une végétation essentiellement composée de graminées et de cypéracées psammophiles (Fall, 1986). Le faciès halophile à *Cyperus*

conglomeratus apparaît comme le pionnier qui subit une évolution progressive pour donner le groupement steppique type qui s'enrichit graduellement par la suite à mesure que l'on s'éloigne des sables vifs du littoral (Raynal, 1961).

Le système de dunes ogoliennes rouges se distingue par des espèces ligneuses telles que *Acacia albida*, *Acacia seyal*, *Balanites aegyptiaca* et *Parinaris macrophyla* plus présentes dans la partie Sud de la zone des Niayes. Les strates arbustives et herbacées sont essentiellement composées d'euphorbiacées telles que *Euphorbia balsamifera*, de combrétacées comme *Guiera senegalensis*, *Combretum glutinosum*, et de graminées saisonnières *Cenchrus biflorus*, *Andropogon sp.* Hormis la végétation d'origine anthropique implantée dans le cadre du projet de fixation des dunes littorales où la plante *Casuarina equisetifolia* a été très utilisée, les rares espèces présentes sont *Opuntia tuna* et *Maytenus senegalensis* (Touré et Fall, 2001).

II.5.2. Végétation des Niayes

La désignation "Niaye" définissait selon Trochain (1940) une formation forestière hygrophile essentiellement constituée de palmiers à huile associés à des espèces d'affinité guinéenne, qui se développent dans et autour des bas-fonds humides en permanence, alimentés par de l'eau douce. Cette définition a cependant beaucoup évolué avec le temps. Les espèces présentes dans ces milieux sont considérées par Trochain (1940) comme des vestiges d'une forêt sub-guinéenne. Ses sols fertiles, très humifères et humides, sont propices aux cultures maraîchères lesquelles sont pratiquées intensivement sur toute la frange littorale. En 1961, les travaux de Raynal définissaient les associations végétales de la zone des Niaye représentant un espace dont la zonation écologique est liée à la proximité de la nappe, elles signalent dans le temps une série progressive, colonie saturée et adaptée à l'approfondissement des cuvettes. Ce dernier fait la distinction entre la Niaye inondée caractérisée par un nombre d'espèces réduit et une dominance des fougères, et la Niaye humide non inondée caractérisée par une végétation riche et variée où se distingue une strate ligneuse (*Alchornea cordifolia*, *Caesalpinia bonduc*), des espèces grimpantes (*Abrus precatorius*, *Adenia lobato*) et des espèces en bordure (*Chrysobalanus orbicularis*). Ces zones humides se caractérisent généralement par la disparition de la végétation naturelle au profit des cultures maraîchères qui progressent régulièrement des bordures vers le centre des dépressions du fait de la qualité du sol et la baisse du plan d'eau (Fall, 1986, Aguiar, 2009). Certaines dépressions dont celles de Fass Boye et de Diogo présentent une typhaie vigoureuse au centre des Niayes. Cette formation représente selon Raynal (1961), les caractéristiques d'une Niaye en voie de dégradation.

L'espèce dominante dans cet écosystème humide est *Elaeïs guineensis* typiquement guinéenne. Elle marque la zone de contact entre le bas du système dunaire et la dépression. Aussi, l'espèce *Cocos nucifera* est bien représentée dans la zone bordant généralement la dépression. La strate herbacée assez importante est conditionnée par la topographie. Du centre de la dépression à sa marge externe, différentes espèces se déterminent sous l'influence de l'eau (Figure 15). Ainsi, au centre des dépressions, des espèces aquaphiles, en particulier *Nymphaea lotus*, *Phragmites vulgaris* et sur les marges, des espèces moins exigeantes en eau. Ces zones humides présentent une forte biodiversité. Un ensemble de 260 espèces a été recensé dans cet écosystème dont les *Poaceae*, *Fabaceae-Faboideae*, *Euphorbiaceae* sont les plus représentatifs (Faye et al., 2014). De plus, ces travaux montrent en plus de la classification des espèces, une comparaison avec la classification de base de Tronchain, 1940, une augmentation de la flore rudérale (lié à l'homme) et une diminution du nombre d'espèces. Ainsi, face à ses différentes activités anthropiques et aux changements climatiques, on distingue une modification de la biodiversité végétale. Le groupement hydrophyte à *Typha* évolue vers les groupements à *Phragmites australis* et *Paspalum vaginatum*, et le groupement à *Aristida stipoides* caractéristique d'une steppe évolue vers une savane arbustive.

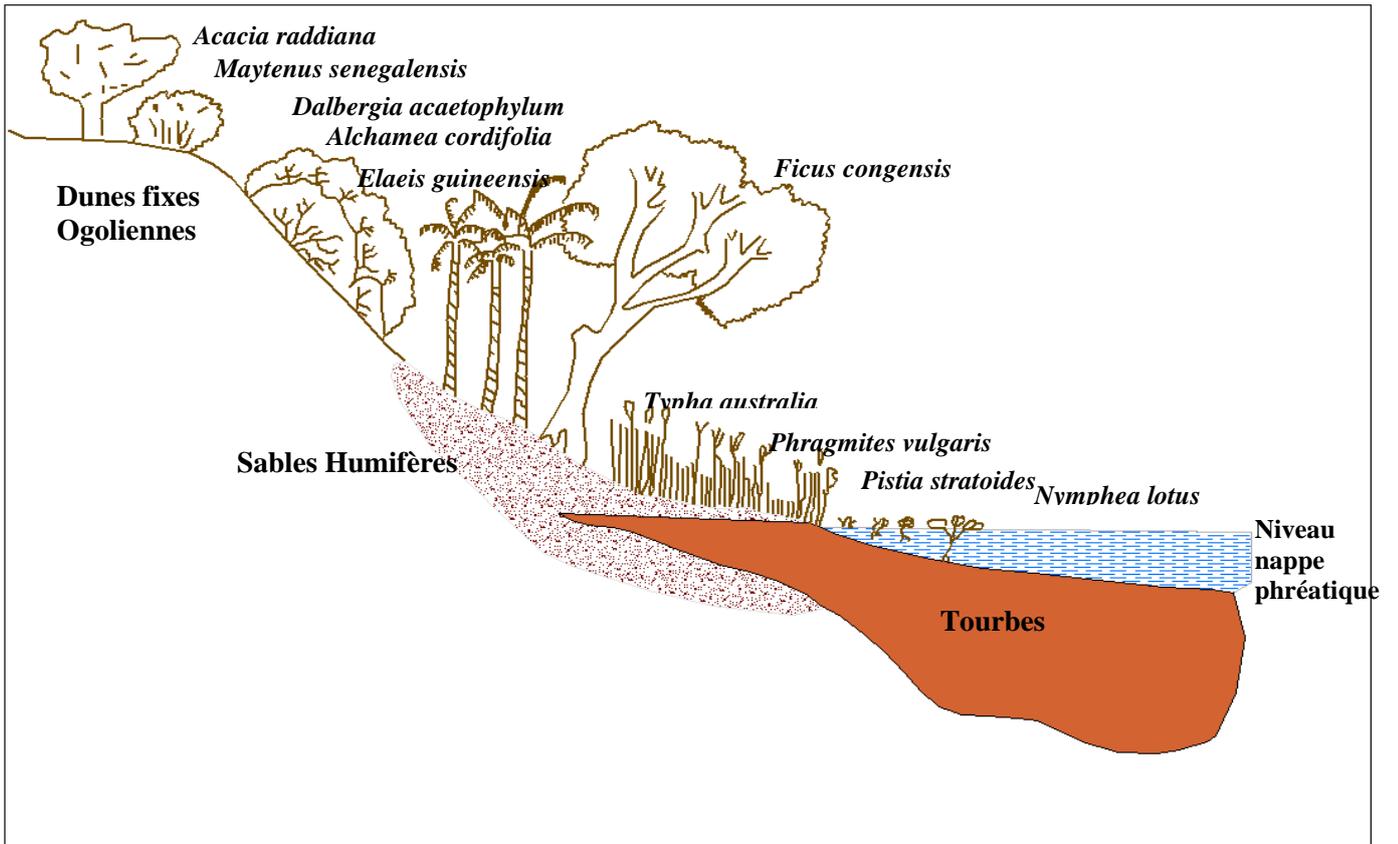


Figure 15 : Représentation schématique d'une Niaye et de sa végétation (Pezeril, 1983) modifié

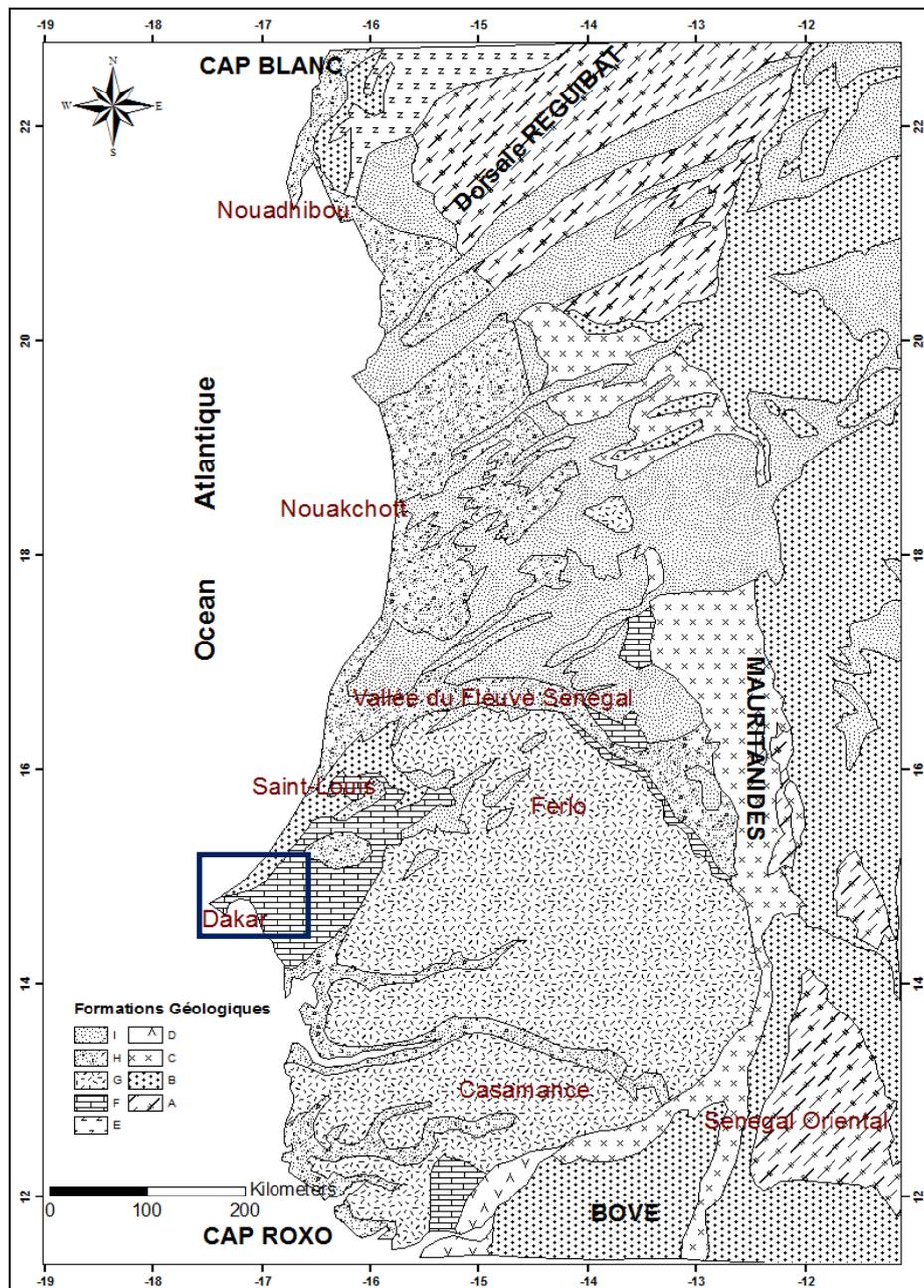
Chapitre III : Contexte Géologique et Hydrogéologique

III.1. Contexte régional du bassin sénégalo-mauritanien / histoire dynamique et principales périodes

Le bassin sédimentaire sénégalo-mauritanien couvre une superficie de 340 000 km² (Hébrard & Elouard, 1976) et s'étend sur une longueur environ 1 300 km entre le Cap Blanc au Nord (Mauritanie) et le Cap Roxo au Sud (Guinée Bissau). Il est limité à l'Ouest par l'Océan Atlantique, au Nord par le socle précambrien de la dorsale Réguibat, à l'Est et au Sud-Est par les formations plissées et métamorphisées de la chaîne des Mauritanides ; et enfin au Sud, il repose sur les sédiments du Paléozoïque du bassin de Bové (Figure 16).

Le bassin sénégalo-mauritanien résulte de la séparation au début du Jurassique de l'Afrique et de l'Amérique du Nord. Durant les dernières étapes de la formation du rift entre le Trias et le Lias, la première invasion marine dans l'Atlantique central naissant provoque le dépôt d'évaporites (sel gemme et gypse à passages d'argiles). Au Jurassique moyen, la transgression s'amorce pour atteindre son maximum au Jurassique supérieur. Ce qui favorise l'installation d'une épaisse plate-forme carbonatée dans le domaine occidental du bassin. L'édification de cette plate-forme se poursuit jusqu'à la fin du Crétacé inférieur où s'intercalent des passages détritiques dans la bordure occidentale du bassin. Les dépôts sont représentés par des calcaires souvent oolithiques, parfois dolomitiques très épais et sont datés par des foraminifères benthiques (Bellion 1987). Le bassin sédimentaire a fait l'objet de plusieurs études géologiques. Les affleurements sont très rares à cause du faible relief et d'un recouvrement sableux quaternaire important. La géologie est surtout connue grâce aux forages pétroliers et hydrauliques. Des synthèses stratigraphiques et géodynamiques ont été faites par Bellion (1987), et plus récemment par Sarr *et al.* (2008) et Roger *et al.* (2009).

La couverture sédimentaire du bassin est constituée d'assises sédimentaires mésozoïques à cénozoïques (Jurassique moyen à Quaternaire) reposant sur le socle précambrien à paléozoïque d'épaisseur variable comme le montre la coupe Est-Ouest du bassin (figure 17).



Formations Géologiques

- I Sables quaternaires (ergs anciens et actuels)
- H Sédiments marins, lacustres et fluviaux quaternaires
- G Cénozoïque altéré ("Continental Terminal")
- F Paléogène
- E Mésozoïque
- D Mésozoïque altéré
- C Chaîne plissée et métamorphisée des Mauritanides
- B Sédiments de couverture de plate forme (Protérozoïque supérieur et Paléozoïque)
- A Socle granitisé du Précambrien

Figure 16 : Géologie du bassin SÉNÉGALO-mauritanien modifiée (Bellion, 1987)

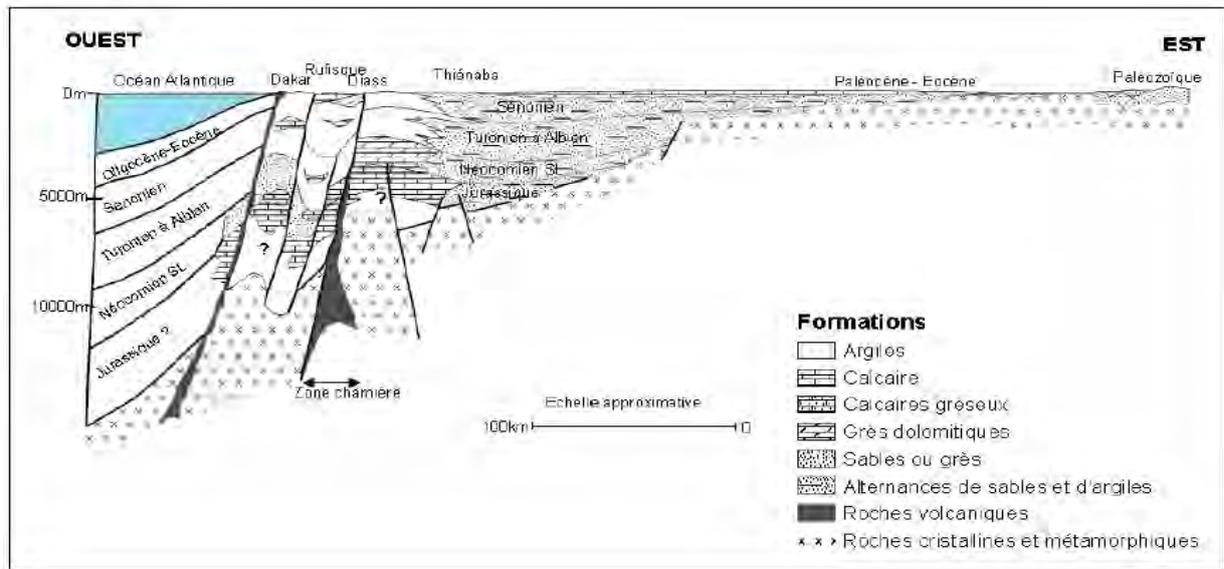


Figure 17 : Coupe Schématisique du bassin sédimentaire sénégalo-mauritanien au parallèle de Dakar modifiée (Spengler et *al.*, 1966)

La lithostratigraphie du bassin sénégalo-mauritanien met en évidence les formations du Secondaire, Tertiaire et Quaternaire dans le secteur Ouest. Le Crétacé, dernière période du Secondaire, est représenté par des sables continentaux, des calcaires détritiques, alternant avec des sables gréseux ou argileux (Tessier, 1950; Castelain, 1963; Spengler et *al.*, 1966; Monciardini, 1966). Les sédiments du Crétacé inférieur (Albien, Cénomaniens, Turonien et Sénonien) se distinguent par la prédominance d'une puissante série argileuse atteignant 2000 mètres à l'Ouest du bassin. Le crétacé supérieur (Campano-Maastrichtien) est caractérisé par des sables parfois argileux et des grès, épais de 200 à 400 mètres.

Le Maastrichtien, sommet du Crétacé, affleure à l'Ouest du bassin sénégalo-mauritanien au niveau du Horst de Ndiass qui est la zone limite au Sud-Est du secteur d'étude. Il est sous forme de grès et d'argiles mais il a été surtout recoupé ou atteint par des sondages présentant un faciès sableux, devenant plus argileux vers l'Ouest en même temps que son épaisseur augmente.

Le Paléocène est représenté généralement par des marnes, marno-calcaires et calcaires. Il affleure, à l'Ouest du Horst de Ndiass. La série paléocène comprend deux unités lithostratigraphiques en continuité à la base des "marno-calcaires" ou de "calcaires argileux" devenant détritiques par endroits, surmontés de calcaires bio-détritiques à tendance récifale, devenant argileux dans la partie occidentale.

III.2. Géologie locale du secteur du Littoral Nord

III.2.1. Lithostratigraphie

Nous nous intéresserons aux formations Eocènes et Quaternaires du secteur d'étude (Figure 18).

III.2.1.1. Formations Eocènes

L'Eocène inférieur ou *Yprésien* est caractérisé par des dépôts marneux ou argileux qui dominant nettement, sauf à l'extrême base et au sommet de la série (Bellion, 1987). Il comporte essentiellement des argiles et marnes, blanchâtres à grises, devenant plus marno-calcaires et calcaires (Figure 18) au sommet dans la région de Thiès. Son épaisseur varie de 100 à 400 m dans l'Ouest du bassin où il est le plus connu.

L'Eocène moyen ou *Lutétien* est représenté par des argiles et marnes à intercalations de silex sur la partie occidentale (Figure 18), tandis que les faciès calcaires sont dominants sur le reste du bassin; les épaisseurs varient de 40 à 200 m. Dans la zone de Tivaouane sur le plateau de Thiès, la série est très riche en phosphates (exploitation à Taiba et Lam-Lam par les ICS).

A cette période, un Lutétien inférieur-essentiellement marneux se distingue d'un Lutétien supérieur calcaire avec des Nummilites à l'Est de la route Thiès-Saint-Louis (Chino, 1962). Ces formations sont karstifiées et compartimentées par des accidents tectoniques orientés globalement suivant la direction Est-Ouest. Ils sont à l'Est d'une ligne Thiès-Kébémér, masqués par les grès et sables argileux du "Continental terminal".

L'Eocène supérieur est principalement constituée de marnes dans le secteur occidental du bassin. Les niveaux de phosphates d'alumine de Lam-Lam sont attribués à cette époque (Tessier et al., 1976) comme le montre la Figure 18.

La succession des faciès de l'Eocène prouve que c'est une période transgressive sur les dépôts du Paléocène ; le maximum de la transgression ayant eu lieu à l'Eocène moyen.

L'Oligocène, partie supérieure du Paléogène correspondrait à des dépôts régressifs. Cette période est rattachée au sommet du groupe phosphaté du plateau de Thiès. Dans la marge occidentale, les dépôts sont des calcaires dont des témoins ont été apportés en surface par des explosions volcaniques fini-tertiaires.

Le **Miocène**, partie inférieure de la période Néogène commence par une transgression matérialisée par des calcaires déposés dans des golfes marins localisés dans la vallée du Sénégal et au Ferlo au Nord. Dans la région de Thiès, il se traduit par une évolution en milieu continental. Un volcanisme intense affecte la marge océanique ainsi que les régions de Dakar et Thiès.

Le **Pliocène** est représenté par un niveau détritique plus ou moins grossier, très riche en oxydes de fer et s'observe en général dans tout le bassin. Il correspond à la cuirasse ferrugineuse dite "fini-tertiaire" qui recouvre les formations du Continental terminal et les coulées volcaniques du Cap Manuel à Dakar. Cette époque ainsi que le **Pléistocène** sont marquées par l'édification de cuirasses ferrugineuses. Les principales zones d'affleurement sont situées sur le horst de Ndiass, au Sénégal Oriental et dans la tête de la Presqu'Ile du Cap-Vert.

Le bassin évoluera en régime essentiellement continental après l'Eocène supérieur et surtout après la dernière et brève transgression Miocène. Les formations marines gréso-argileuses miocènes sont par la suite profondément altérées par la percolation des eaux souterraines lors d'une phase d'abaissement du niveau marin (Faye, 1995). Ce faciès d'altération appelé "Continental Terminal" (Tessier et *al.*, 1975; Lappartient, 1985) implique des conditions climatiques tropicales humides, de même que la formation de la cuirasse latéritique fini-pliocène. Dans la zone étudiée, il se localise particulièrement à l'Est de la route Thiès -Saint Louis et surmonte les calcaires lutétiens.

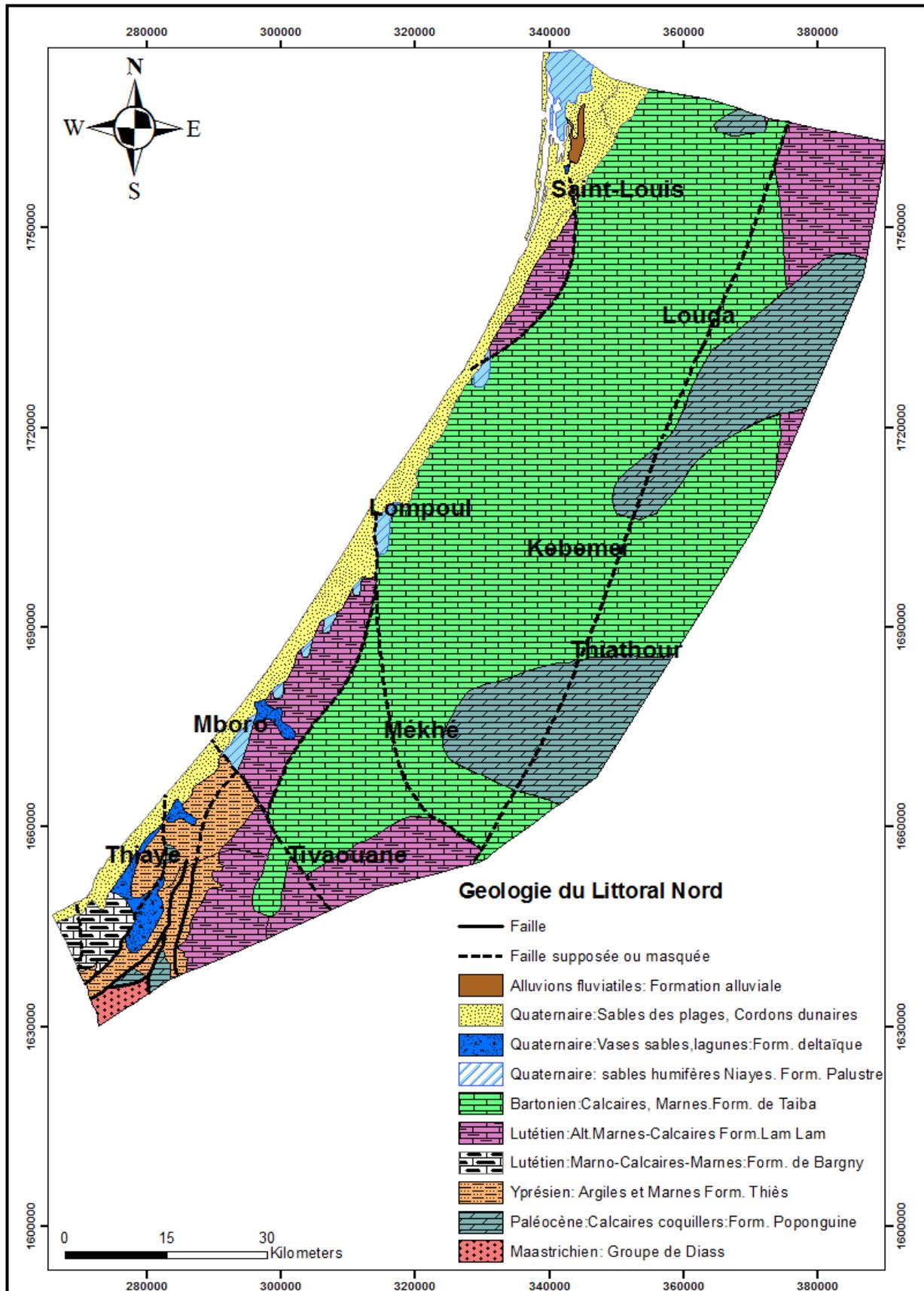


Figure 18 : Géologie du Littoral Nord (Geoter, 2009)

III.2.2. Formations quaternaires

III.2.1.2.1. Continental terminal

Une grande partie du bassin sénégal-mauritanien est recouverte par une formation gréseuse et sablo-argileuse appelée "Continental terminal". Celui-ci représente l'ensemble des étages allant du Mio-Pliocène au Quaternaire. Ces dépôts seraient d'origine marine bien qu'on ait, pendant longtemps, pensé qu'ils étaient continentaux. (Flicoteaux et *al.*, 1980).

III.2.1.2.2. Quaternaire

Le Quaternaire constitue le terme supérieur et forme la majeure partie des affleurements de la série sédimentaire du bassin sénégal-mauritanien. Il est constitué de dépôts sableux, sablo-argileux d'origine marine ou continentale. Cette puissante série sédimentaire d'une épaisseur moyenne de plus de 70 m et qui atteint 161 m à Mbenguène est attribuée au Quaternaire. La présence d'*Arca senilis* à la base de cette série dans les forages de Ndiar-Ndiar et Thiabam en est une preuve.

La réalisation de forages de profondeur moyenne effectués dans le cadre du projet O.M.S Sénégal PIP.D1 en 1974, les travaux de Chateaufort et Perzeril, 1984, Pimmel 1984, Pinson-Mouillot 1980, Martin, 1970, ont permis de mieux étudier ces différentes formations géologiques. L'histoire de la géodynamique du secteur a été consacrée à l'étude des formations quaternaires (Hébrard, 1958; Elouard, 1967; Martin, 1970; Pezeril et *al.*, 1986). L'analyse de la figure 18 montre une synthèse des événements au cours des différentes périodes. Il se distingue ainsi d'une part un Quaternaire ancien ou Pléistocène (composée de l'Inchirien et Ogolien) et d'autre part un Quaternaire récent ou Holocène (constitué du Tchadien, Nouakchotien, Tafolien, Sub-actuel et Actuel) (Tableau 2).

❖ *Inchirien (40 000 – 30 000 ans B.P.)*

Ce sont des formations margino-littorales retrouvées dans les niveaux enfouis du Delta du fleuve Sénégal ou en mer sur des fonds de - 20 à - 30 m (Diouf, 1989). Ce sont des sables marins coquillers localement riches en ilménite (sables noirs) et recouverts par les sables éoliens présentant en surface une altération continentale (argile à graviers de latérites) (Martin, 1970, Hébrard, 1958). A cette période, le niveau marin remonte et le climat redevient humide. Les dépôts continentaux sont alors soumis à l'altération pédo-génétique (Tableau 2).

A la fin de l'Inchirien, une régression marine s'amorce et oblige les cours d'eau à entailler leur cours à la recherche d'un équilibre. C'est à cette époque que se seraient formées les vallées fossiles qui entaillent les formations tertiaires dans la bordure septentrionale du horst de Ndiass. Entre 30 000 et 20 000 ans B.P., une période humide suivie d'une sécheresse généralisée est repérée dont le maximum se situerait vers 18 000 ans B.P.

L'Inchirien I (40 000 - 37 000 ans B.P.) est caractérisé par des sables grossiers coquillers en milieu marin et les formations continentales présentent un démantèlement de la cuirasse, granules et graviers (Tableau 2). Son épaisseur maximale est de 75 m. On assiste à la subsidence de la région du Delta du Sénégal.

L'Inchirien II (37 000 – 31 000 ans B.P.) se distingue par des dépôts littoraux grésifiés (beach rock) et la re-cimentation des graviers et granules (Tableau 2). Il se produit la formation des golfes de Mauritanie et du cours du fleuve Sénégal. La transgression fait remonter la mer de + 20 m sur le littoral.

❖ *Ogolien (20 000 – 12 000 ans B.P.)*

Le Pléistocène se termine par une période aride qui voit se mettre en place un environnement essentiellement continental, durant l'Ogolien (20 000 à 15 000 B.P.). Il se produit la formation de massifs dunaires (dits Ogoliens par analogie à ceux découverts en Mauritanie dans l'Ogol) orientés NE-SW avec un relief très vigoureux dans la zone littorale et qui s'érousse vers l'intérieur sous l'action du vent. Leur matériel quartzeux est parfaitement classé (0,1 à 0,5 mm) et comporte un cortège de minéraux à ilménite, zircon et rutile (Pezeril et *al.*, 1986). Entre 15 000 et 12 000 ans B.P., les premiers indices d'humidité réapparaissent. La régression amorcée à la fin de l'Inchirien se poursuit et le niveau de la mer atteindrait -100 à -120 m vers 15 000 ans B.P. Le climat est très humide, et les alizés continentaux mettent en place des ensembles dunaires de direction NE (Tableau 2).

L'Ogolien se manifeste par un retrait de la mer qui a pu atteindre un niveau de -120 m. La mise en place de massifs dunaires orientés NNE-SSW est faite sur une bonne partie du bassin du Sénégal. Ces massifs sont constitués de sables fins bien classés, à faible teneur en argile et minéraux lourds (Hébrard, 1966, Monteillet, 1986).

❖ *Tchadien (12 000 - 7 000 ans B.P.)*

Le Tchadien s'identifie par la formation des sols ferrugineux rouges sur les dunes ogoliennes, la remontée du niveau marin et l'envahissement par les eaux salées des zones basses ou lacustres

proches du littoral. Le climat très humide favorise l'installation de réseaux hydrographiques et de lacs dans les inter-dunes (Tableau 2), l'installation d'une végétation d'affinité guinéenne autour des lacs inter-dunaires et la formation de vasières dans le domaine pré-littoral (Pinson-Mouillot, 1980). De plus, les tourbes de la zone des Niayes qui représentent des formations originales ont été datées de 8 000 à 10 000 ans B.P.. La fin du Tchadien (vers 7000 B.P.) est marquée par une phase d'aridité qui aurait provoqué un remaniement limité des dunes ogoliennes qui se traduit par une accentuation des contrastes altitudinaux, un réalignement dans la direction N-S (Sall et *al.*, 1978) et l'assèchement des lacs.

❖ *Nouakchottien (7 000- 4 200 ans B.P.)*

Le climat redevient plus humide. La mer transgressive pénètre dans les basses vallées et y provoque des dépôts d'argiles sableuses associées ou non à des coquilles. L'amélioration de la pluviométrie aura pour conséquence un ruissellement intensif, la formation de lagunes pré-littorales et la réinstallation de lacs dans les dépressions inter-dunes (Tableau 2).

❖ *Tafolien (4 200 - 2 000 ans B.P.)*

La régression amorcée à la fin du Nouakchottien se poursuit malgré quelques fluctuations positives et le climat s'assèche progressivement (Tableau 2) La mer édifie les cordons littoraux de dunes jaunes qui ferment les golfes nouakchottiens et isolent des lagunes côtières sur-salées.

❖ *Subactuel (2 000 – 1 700 ans B.P.) et Actuel*

L'évolution du climat est caractérisée par un déficit pluviométrique de plus en plus accentué. Le processus éolien entraîne la réactivation des sables dunaires (Tableau 2) qui tendent à ensevelir les dépressions des Niayes (Sall, 1982).

Ainsi, les dépôts quaternaires fortement représentés dans le secteur d'étude sont très tributaire du climat et du niveau de la mer qui ont façonné progressivement l'environnement géomorphologique et géologique actuel. Une synthèse géochronologique met ainsi en évidence les différents types de dépôts et la paléogéographie en fonction de l'évolution des temps géologiques du Quaternaire (Tableau 2).

Tableau 2 : Synthèse Géochronologique du Quaternaire

Mer	T	T	R	R	R	T	R	T	R	R	T	T
Temps	Humide		Très Humide	Très Humide	Aride	Humide	Sec	Sec				
Climat	Sahélien	Soudanien	Sahélien-Aride	Humide - Sec	Sahélien	Soudano-guinéen	Soudano-guinéen - Sahélien					
Age (ans BP)	40 000-37 000	31 000	20 000-12 000	10 000- 8 000	7 000	4 200	4000-2000	1700				
Période	INCHIRIEN I	INCHIRIEN II	OGOLIEN	TCHADIEN		NOUAKCHOTTIEN	TAFOLIEN	SUB-ACTUEL ACTUEL				
Types de Dépôts	-Sables marins coquillers riches en Ilménites recouverts par sables éoliens Dépôts continentaux par altération pédo-génitique	Dépôts littoraux gresifiés (Beach rock)	Massifs dunaires Ogoliens (Altération éolienne)	-Sols ferrugineux sur les dunes ogoliennes -Réseau Hydrographique - Lacs inter-dunaires, Mangroves, Lagunes, Vasières, - Formation de Tourbes -Végétation guinéenne	Assèchement lacs Phase d'aridité	-Argiles sableuse -Formation Lagunes, Lacs inter-dunaires -Tourbes	-Cordons Littoraux de dunes jaunes -Fermetures golfes nouakchouttiens et lagunes côtières	-Réactivation des sables dunaires - Ensevelissement des Niayes				
Paléogéographie	Subsidence région delta Sénégal	Littoral + 20 m. Formation des golfes de Mauritanie et du cours Sénégal	Littoral -50 m, puis -100m, Creusement des vallées du Sénégal et Gambie	Littoral -20 m, Lagunes et Mangroves Lacs inter-dunaires		Littoral + 1,5 m Cordons Littoraux successifs, nombreuses lagunes, lacs intermédiaires	Courant de dérive littorale N-S régularise les côtes su Sénégal -Larges plages sableuses	Fermeture des lagunes côtières, évolution des lacs sur-salés Régression des lacs intermédiaires				

NB : (T : Transgression, R : Regression)

III.2.3. Tectonique

Les logs de sondages de prospection, les données géophysiques et l'interprétation des photos aériennes ont permis de comprendre la structure de l'ensemble du bassin sédimentaire du Sénégal (Monciardini, 1965 Bellion, 1985, Le Priol, 1985). Certains accidents tectoniques sont présents dans le secteur d'étude avec la zone Sud très affectée par la présence de failles (cf Figure 18).

Dans le secteur étudié, les structures suivantes peuvent être identifiées :

- un bombement appelé dôme de Léona allongé NE-SW qui se prolonge vers la Mauritanie;
- une fosse subsidente établie entre Kelle et Léona (BRGM, 1967) qui affecte tous les niveaux d'âge tertiaire et bute vers le Nord contre le dôme de Léona ;
- une remontée des formations tertiaires le long de la bordure orientale du secteur d'étude qui va du massif de Ndiass au Nord de Louga ;
- un accident majeur entre Louga et Ngnit, d'orientation SW-NE qui sépare la nappe des sables de celui des calcaires lutétiens.

Des linéaments avec des directions très variées sont observés (Le Priol, 1985). La plupart de ces linéaments seraient des failles continues ou discontinues (cf Figure 18).

III.3. Contexte Hydrogéologique

III.3.1. Contexte hydrogéologique à l'échelle du bassin du Sénégal

L'hydrogéologie du bassin sédimentaire est caractérisée par une superposition de niveaux aquifères contenus dans des formations sableuses, sablo-gréseuses et calcaires, qui sont séparés par des niveaux imperméables (marnes, argiles...). En fonction, des conditions de gisement que sont principalement la nature lithologique et la profondeur du réservoir, il se distingue des aquifères superficielles et semi-profondes, et une nappe profonde. Les systèmes aquifères constituent donc les nappes des sables quaternaires, du Continental terminal, de l'Oligo-miocène, des calcaires lutétiens, des calcaires paléocènes, la nappe du horst de Ndiass qui sont superficiels à semi-profonds et la nappe profonde du Maastrichtien (Figure 19).

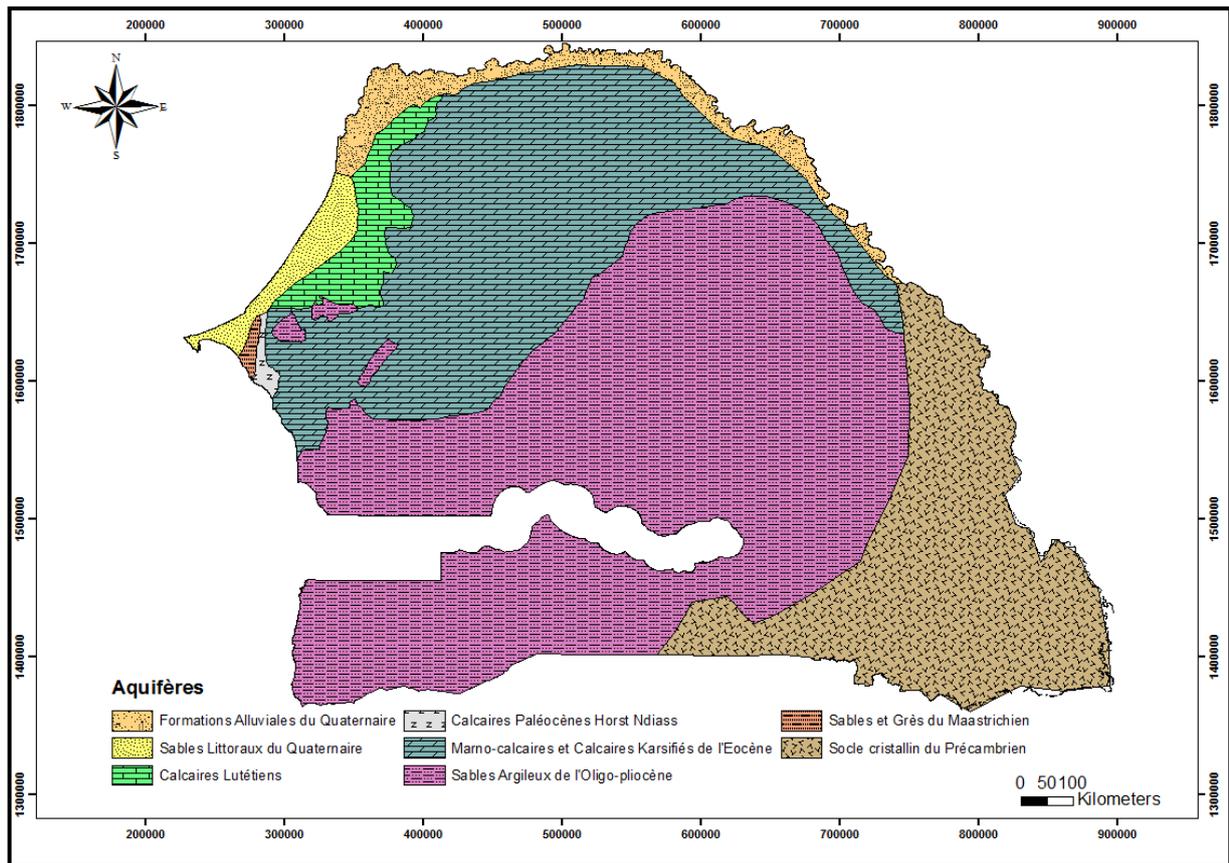


Figure 19 : Aquifères du Sénégal (Travi, 1988) modifiée

Le système aquifère des sables quaternaires se localise de la tête de la presqu'île et se prolonge au Nord par un cordon dunaire allant de Dakar à Saint-Louis. Au niveau de cette bande littorale, les formations secondaires et tertiaires essentiellement argileuses et marneuses ne présentent pas d'intérêt hydrogéologique. Les formations sableuses du Quaternaire renferment trois nappes : la nappe des sables infra-basaltiques, la nappe des sables quaternaires de Thiaroye, et celle du Littoral Nord.

❖ **Nappe des sables infra-basaltiques**

Elle se localise au niveau de la tête de la presqu'île du Cap Vert et se compose d'une partie occidentale captive et multicouche, et une partie orientale libre. Elle est contenue dans les sables marins quaternaires situés sous les coulées volcaniques des Mamelles. Cet aquifère est largement en communication avec l'Océan Atlantique qui constitue ses limites Ouest, Nord et Sud. Ceci l'expose au problème d'une intrusion saline accentuée par une surexploitation de la nappe. Sa limite Est se trouve au niveau de la Patte-d'Oie. Actuellement, cette nappe est exploitée à plus 18 000 m³/j pour l'AEP de la ville de Dakar.

❖ **Nappe des sables quaternaires de Thiaroye**

Elle constitue le prolongement Est de la nappe infra-basaltique qui représente sa limite Ouest. Elle est limitée au Nord par l'Océan Atlantique, au Sud par le substratum marneux tertiaire du graben de Rufisque et à l'Est par la dépression du lac Tanma à Kayar. La nappe est libre à semi captif, contenue dans les sables dunaires et les alluvions graveleuses reposant sur les marnes et argiles de l'Eocène. Cette nappe participe actuellement pour environ 5 000 m³/j à l'alimentation en eau potable de Dakar (ANTEA & SENAGROSOL, 2003). Du fait de la faible profondeur de la nappe, des effets de pollution et du risque d'inondation lié à un arrêt des pompages, des solutions de dilution par mélange avec les eaux provenant des autres nappes ont été mises en place pour maintenir le débit de pompage à 5 000 m³/j (Diouf, 2012)

❖ **Nappe du littoral Nord**

Cette nappe est contenue dans les sables quaternaires dunaires entre Kayar et Saint-Louis. Cette nappe couvre une superficie de 2 300 km². Elle constitue avec la nappe des calcaires lutétiens dans la région de Louga, la nappe des calcaires de l'Eocène inférieur à Bambey et la nappe des marno-calcaires de l'Eocène inférieur dans la région de Baba Garage le « système hydraulique du Littoral Nord ». Ce système s'étend sur une superficie d'environ 8 600 km² et contient d'importantes ressources en eau douce (Faye, 1995). Ce système assure l'AEP des populations urbaines et rurales des départements de Tivaouane, Kébémér, Louga, Bambey, Diourbel. Elle couvre aussi les besoins en eau pour les activités agricoles et pastorales de ces localités ainsi que ceux du secteur industriel telles que les exploitations minières des ICS et MDL. Ce système vient par ailleurs en appoint à l'AEP de la capitale Dakar et de ses villes environnantes.

III.3.2. Hydrogéologie du secteur d'étude

III.3.2.1. Synthèse des connaissances/historique des recherches

La première étude faite en 1955 visait à répondre aux besoins d'alimentation en eau des installations de la Compagnie Sénégalaise des Phosphates de Taïba. Ces études se sont poursuivies avec la Mission d'Aménagement du Sénégal, à l'ensemble de la zone des Niayes pour la mise en valeur hydro-agricole de la région. Les travaux de Degallier (1962) ont montré la complexité de l'écoulement de la nappe phréatique ainsi que ses relations avec les Niayes. Durant la même année, Michel (1956), en s'appuyant sur les campagnes de forages et de sondages réalisés notamment à Louga, fit une première synthèse des connaissances générales sur la région. Dans les années 1960, les études menées par le BRGM ont mis l'accent sur les prospections hydrogéologiques pour l'AEP de Dakar. En 1962, Putallaz propose une synthèse des données antérieures suivies en 1974 et 1979 dans le cadre du projet *PNUD/OMS*. C'est ainsi que la connaissance hydrogéologique du secteur connu un essor avec la mise en place d'un réseau de piézomètres par l'OMS. Les travaux de Gaye, 1990 sur la recharge ont montré un taux de renouvellement qui varie entre 6,7 à 80 mm/an dans la zone de Louga dans le cadre du projet CRDI sur la "Gestion des Nappes des Niayes". Ce projet a permis également une caractérisation hydrochimique de la nappe (Kane, 1995) et la réalisation d'un modèle conceptuel (Faye, 1995) pour simuler les prélèvements jusqu'à l'horizon 2020 mettant en évidence une intrusion saline dans la partie du Nord du secteur.

III.3.2.2. Géométrie et structure du système aquifère

L'aquifère des sables quaternaires couvre une superficie de 2 300 km². Le réservoir de la nappe des sables quaternaires présente deux ensembles géologiquement bien distincts (Figure 20) :

- à l'Ouest de la route Thiès-Saint-Louis, l'aquifère est constitué de dépôts sableux et argilo-sableux reposant sur le substratum marneux ou marno-calcaire de l'Eocène (Noël, 1978). Cette série sableuse quaternaire atteint 161 mètres d'épaisseur à Mbenguène du fait de l'érosion post Eocène et surtout de la tectonique avec l'affaissement de certains compartiments.
- à l'Est, le recouvrement quaternaire s'amenuise et ne subsiste que sous forme d'un sable dunaire superficiel qui reposent sur les calcaires du Lutétien supérieur.

Ces formations sableuses quaternaires se comportent donc comme un réservoir unique qu'elles soient d'origines marines ou continentales. Certains auteurs ont admis que le contact entre ces deux aquifères à l'Ouest et l'Est de la route Dakar - Saint-Louis se fait à la faveur d'un accident

tectonique qui permet une bonne continuité hydrodynamique (Puttallaz, 1962; Noël, 1978, Pernel et Gageonnet, 1992). Néanmoins, ce réservoir est en contact direct avec les eaux salées de l'Océan à l'Ouest, et son épaisseur est liée essentiellement à la morphologie de son substratum imperméable tertiaire. Cette épaisseur est très variable d'une zone à une autre (Diouf, 1995) mais d'un point de vue hydrogéologique, il s'agit d'un réservoir unique qui présente d'importantes réserves en eaux douces exploitables estimées à plus de 320 000 m³/jour (Travi, 1988).

Les coupes hydrogéologiques mettent en exergue un quaternaire plutôt sableux et argilo-sableux contenant un cordon de sable franc à l'Ouest du secteur avant d'atteindre le substratum marno-calcaire (Figure 21). L'accident tectonique au NNE au niveau de Ndiock Sall montre la transition avec l'aquifère des calcaires lutétiens. Dans la zone centre du secteur au niveau de Kebemer, cet accident tectonique observé montre le passage de l'aquifère sableux à l'Ouest à l'aquifère calcaire à l'Est.

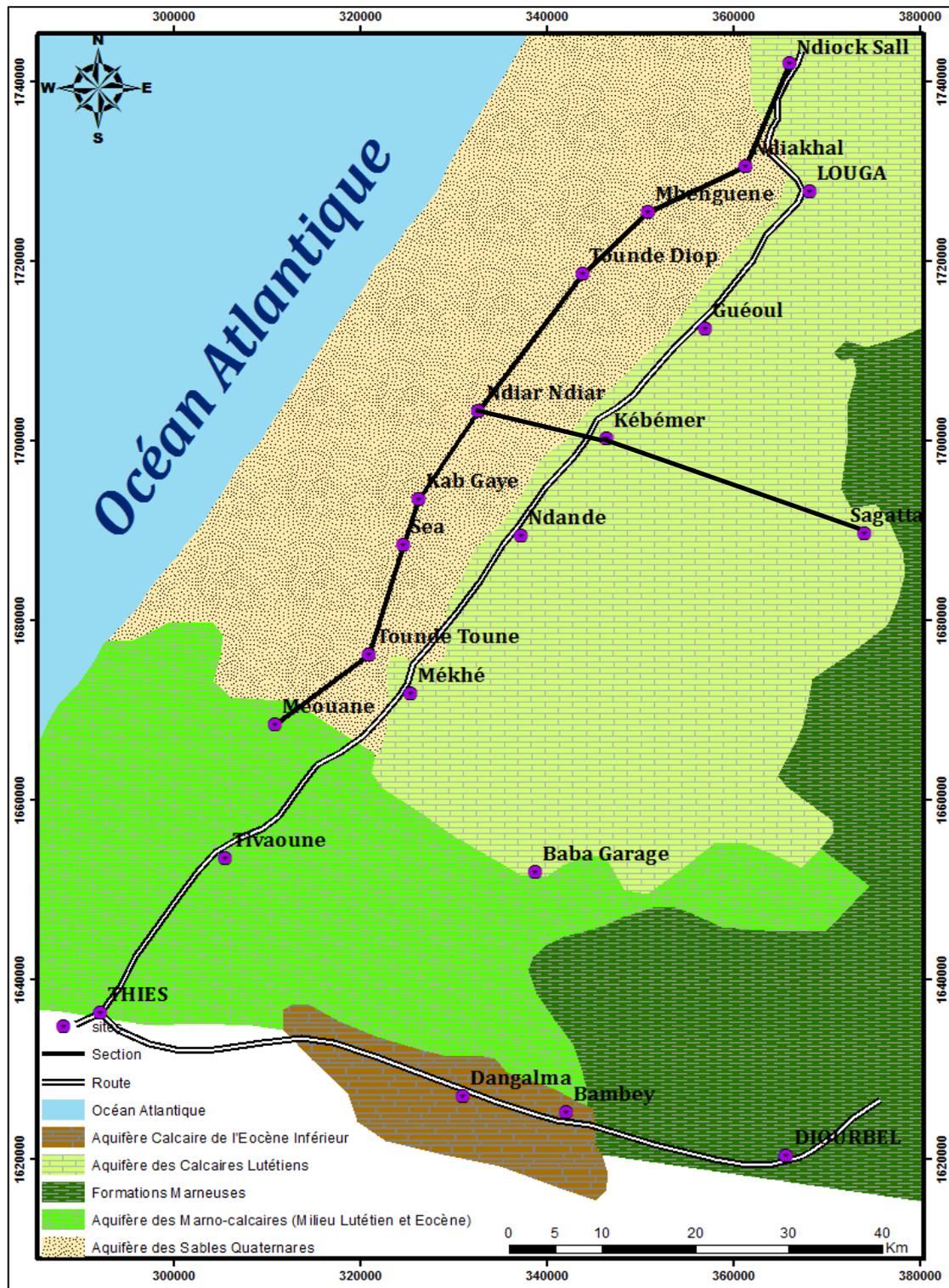


Figure 20 : Aquifères du secteur Littoral Nord

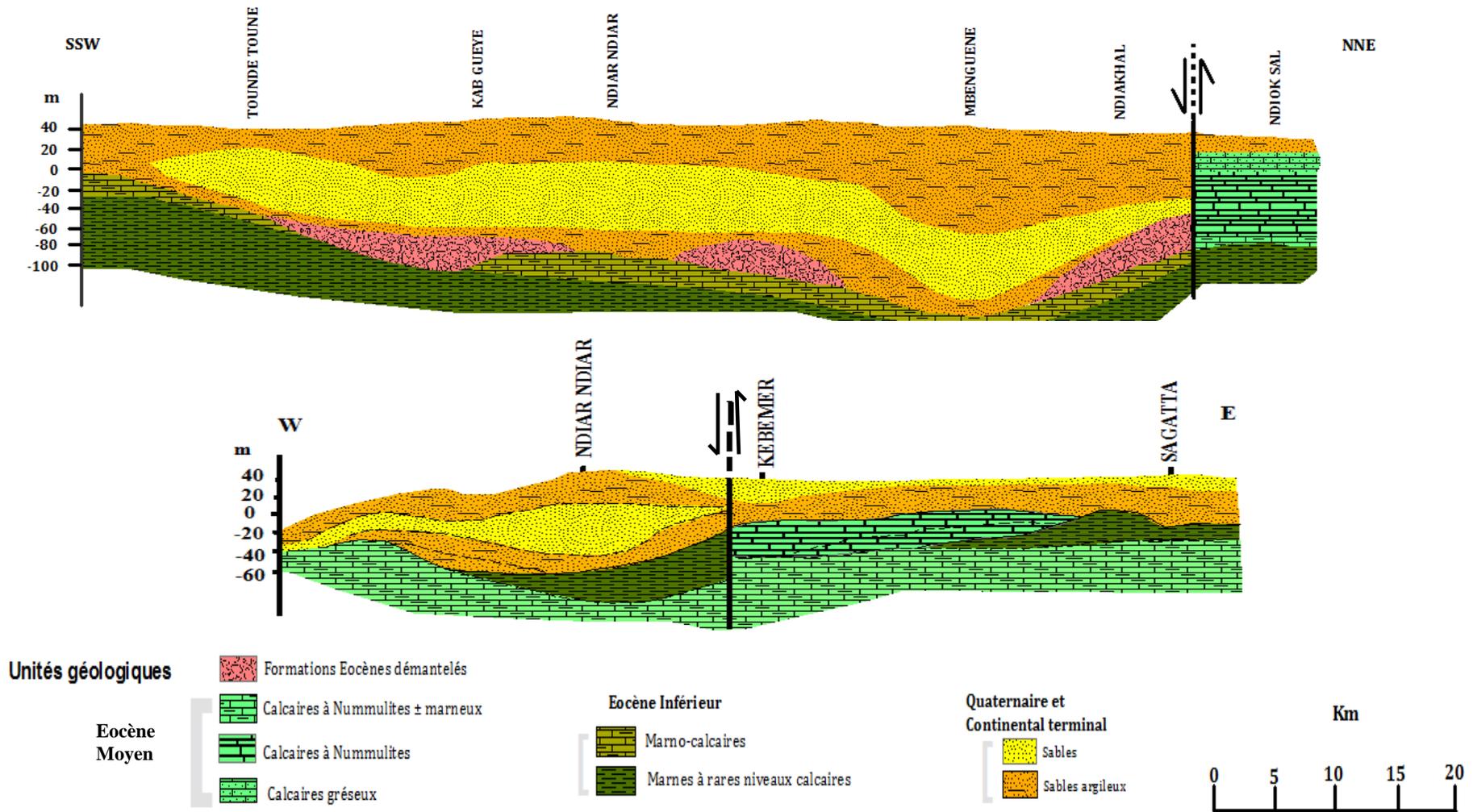


Figure 21 : Coupe hydrogéologique SSW-NNE et E-W du secteur Littoral Nord modifiée (Pernel et Gageonnet 1992)

III.3.2.3. Caractéristiques hydrauliques

❖ Morphologie de la surface piézométrique

Pour cette description, la référence choisie est la carte piézométrique de Juillet 1975 établie à partir des données des travaux de Noël (1978) où un réseau de points de mesure très dense a été observé. L'analyse piézométrique de celle-ci indique un bombement piézométrique très accusé au Sud-Ouest de la zone qui s'allonge parallèlement au littoral. Il est axé sur le réservoir des sables quaternaires et s'affaisse progressivement vers le Nord suivant un gradient décroissant où il tend à approcher le niveau 0 IGN de la mer. Le sens d'écoulement est divergent du dôme d'une part à l'Est vers les calcaires lutétiens; et d'autre vers les Niayes en s'écoulant vers l'océan Atlantique. Les forts gradients (1,7 à 3 %) observés sur les flancs du bombement correspondent à une diminution de la perméabilité de l'aquifère liée à des terrains plus argileux (Faye, 1995). Cette morphologie très marquée s'oppose une piézométrie très plane couvrant l'aquifère des calcaires lutétiens à l'Est de la route Thiès - Saint-Louis qui est le résultat de leur forte perméabilité. Dans ces terrains, aucun axe de drainage n'est vraiment perceptible.

De plus, la remontée du substratum marneux au Nord-Est (Sagatta) est due à un léger bombement piézométrique nommé le dôme de Coki. La surface de la nappe se situe dans le recouvrement argilo-sableux et les débits d'apport par cette limite sont très faibles.

Ainsi, la morphologie de la piézométrie permet à la nappe d'être protégée de l'invasion saline jusqu'à la latitude de Louga grâce au bombement piézométrique. Au-delà, par contre, elle paraît plus vulnérable à la progression d'eau salée en provenance du delta du fleuve Sénégal et de l'océan.

❖ Situation piézométrique du secteur

L'analyse piézométrique des années 1975 et 1991 traduit une baisse d'environ 5 à 10 m au niveau du sommet piézométrique, l'affaissement qui diminue rapidement vers le Nord pour s'annuler pratiquement dès la latitude de Ndande, à l'exception du flanc Est en raison des forts pompages concentrés à Tounde, Kelle et Kebemer (BRGM, 1992). Au cours des quatre campagnes de terrains réalisées en Juillet 2010 (A), Juin 2011(B), Février 2012 (C) et Octobre 2012 (D), la piézométrie met en évidence à l'Ouest de la route nationale Dakar - Saint-Louis, le dôme piézométrique qui s'allonge suivant un axe SW-NE avec un sens d'écoulement divergent (Figure 22). La nappe s'écoule d'une part vers l'Océan constituant ainsi une barrière à une progression du front salé principalement dans la zone Sud et d'autre part vers les calcaires lutétiens à la faveur d'une limite non étanche. Un resserrement des courbes iso-piézométriques

dans la zone Sud alors que dans la zone Nord, l'écartement des isopièzes devient de plus en plus grand à mesure que l'on progresse vers le Nord où le niveau de la nappe se rapproche du zéro IGN de la mer. Le niveau piézométrique est maximal à Tawa Mbaye des valeurs de 16,8; 16,7; 16,6 et 16,6 m, et minimal à Keuleul avec des valeurs de -4,2; -4,2; -4,3 et -4,2 m respectivement au cours des campagnes de terrain de Juillet 2010, Juin 2011, Février 2012 et Octobre 2012 (Figure 22). Un dôme piézométrique de hauteur décroissante au cours du temps est donc mis en évidence. Celui-ci était en moyenne de 40 m en 1965, 35 m en 1985 (Faye, 1995) puis en 20 m en 1991 (Kane, 1995), il est de 16,5 m en 2012. Ce niveau diminue en moyenne de 8 cm/an au cours trois années considérées. Ceci confirme la baisse de 7 à 10 cm en moyenne dans les travaux du projet "Gestion des Nappes des Niayes" et ceux réalisés par le Ministère de l'Hydraulique et le Programme des Nations Unies (1994) principalement sur le flanc Ouest du dôme piézométrique. Ceci pourrait se justifier par la forte reprise évaporatoire de ces dernières décennies, un prélèvement important au niveau des sites de captage de Kelle, Kébémér et Louga; les prélèvements industriels pour les phosphates de Taïba et l'exploitation de Zircon de la grande côte et enfin la pression démographique importante surtout au Sud du secteur.

❖ Fluctuation de la nappe

Les fluctuations de la nappe des sables quaternaires dépendent essentiellement des échanges de flux dans le système aquifère. Les entrées correspondent à la fraction des hauteurs de précipitation qui atteint effectivement la nappe et celle-ci dépend de la nature lithologique des sols et donc de leur perméabilité. Les flux sortants correspondent aux pertes par évaporation, évapotranspiration, les prélèvements et écoulements dans d'autres systèmes.

❖ Les paramètres hydrodynamiques

Dans les sables quaternaires, les valeurs des transmissivités (T) sont comprises entre $5,5 \cdot 10^{-4}$ et $8 \cdot 10^{-2}$ m/s et les valeurs de conductivité hydraulique (K) varient entre $2,8 \cdot 10^{-5}$ et $8,9 \cdot 10^{-4}$ m/s (BRGM, 1992; Gaye, 1990, OMS, 1974; Noël, 1978). Les plus fortes valeurs se retrouvent dans la zone axiale de la fosse du substratum marneux ($5,9$ à $8,5 \cdot 10^{-4}$ m/s). Tout autour de cette zone axiale, la perméabilité diminue jusqu'à $2,8 \cdot 10^{-5}$ m/s. Les travaux de GWK Consult en 2009 mettent en évidence dans les sables des valeurs de transmissivités variant de 1 à $3,5 \cdot 10^{-5}$ m/s dans la zone axiale de la fosse, et de $1,3 \cdot 10^{-3}$ à $9,7 \cdot 10^{-4}$ m/s tout autour. Les données d'essai de pompage de l'étude du BRGM, 1992 (Figure 23) ont permis de faire une cartographie des paramètres hydrodynamiques. Elles montrent que la zone Nord Est à Ndiok Sall possède les

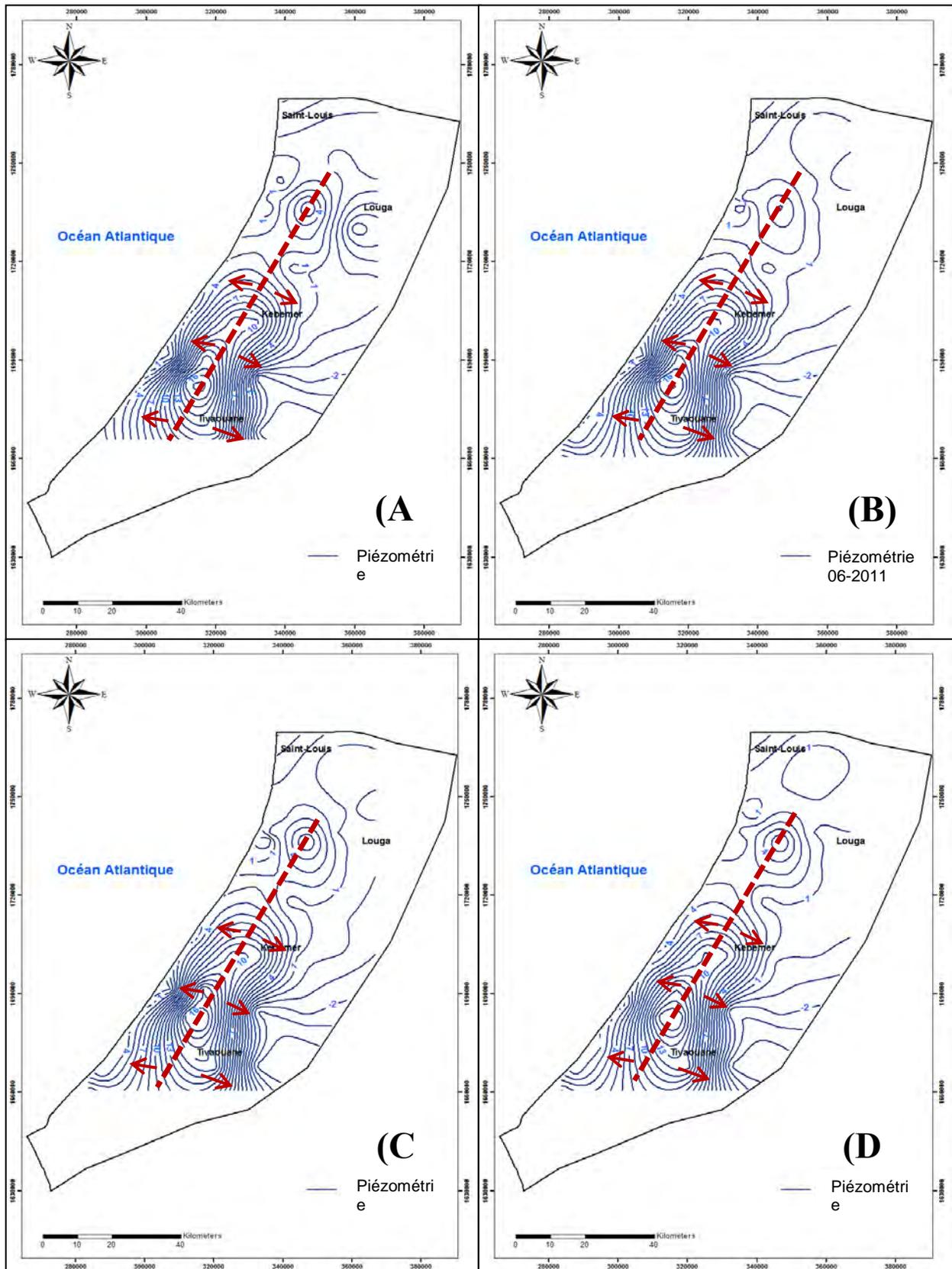


Figure 22 : Cartes piézométriques de la zone du Littoral Nord

plus fortes transmissivités ($6,5 \cdot 10^{-2}$ m/s) et des faibles perméabilités ($0,087 \cdot 10^{-1}$ m/s). La zone centrale de Kebemer possède par contre les plus fortes valeurs de perméabilité ($5,2 \cdot 10^{-1}$ m/s) pour une transmissivité moyenne de $2 \cdot 10^{-1}$ m/s.

Les coefficients d'emmagasinement obtenus par pompage d'essais varient entre $2,7 \cdot 10^{-4}$ et $4,5 \cdot 10^{-4}$. Ces différentes valeurs justifient l'hétérogénéité du milieu certainement lié à la proportion d'éléments argileux contenus dans l'aquifère sableux qui peut varier d'un endroit à l'autre; et donc ainsi maintenir la stabilité du dôme piézométrique.

Dans l'aquifère des calcaires lutétiens, les valeurs de K et T sont beaucoup plus variables du fait à l'hétérogénéité de la karstification dans cette formation. Les valeurs de K oscillent entre deux extrêmes $7,4 \cdot 10^{-3}$ et $2,5 \cdot 10^{-6}$ m/s, tandis que celles de T varient entre $2,9 \cdot 10^{-1}$ et $2,0 \cdot 10^{-5}$ m/s, les plus fortes valeurs se situant respectivement dans les zones de Guéoul au Nord ($3,5 \cdot 10^{-2}$ m/s); Tawa Fall ($3,6 \cdot 10^{-2}$ m/s) au Sud du massif calcaire.

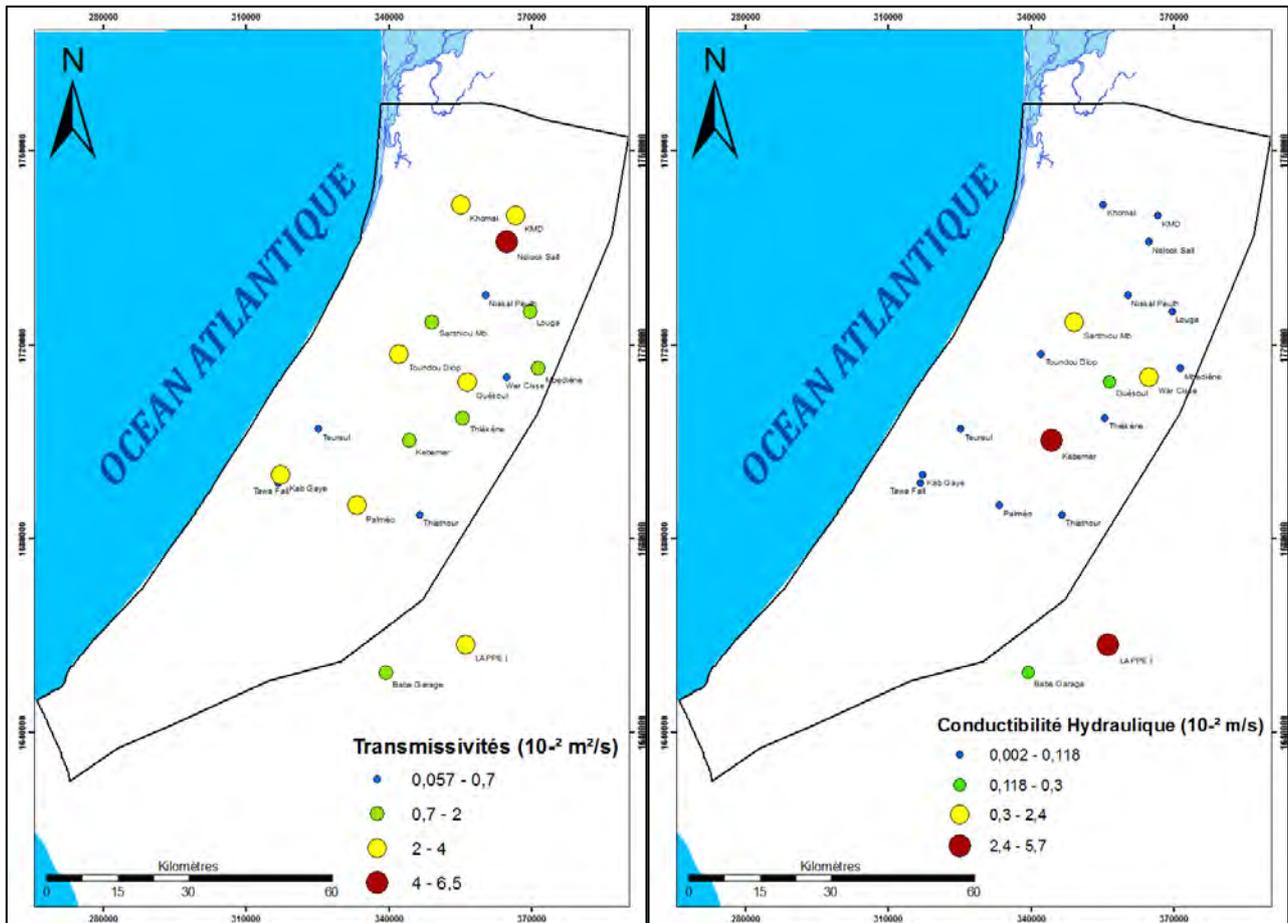


Figure 23 : Cartographie des transmissivités et de la perméabilité (source BRGM, 1992)

❖ **Exploitation de la nappe**

La nappe dans le secteur est exploitée pour l'Approvisionnement en Eau Potable (AEP) des régions Thiès, Louga, Kebemer et Saint-Louis, mais aussi de la capitale Dakar et ses environs en eau potable. Elle sert aussi à l'irrigation des cultures ainsi qu'aux activités industrielles, pastorales et domestiques. L'attractivité de la zone côtière et le développement des activités socio-économiques ont largement contribué à l'augmentation de la demande en eau. Cette exploitation pour l'AEP est suivie par le réseau de la SONES et concerne particulièrement les zones entre Kelle et Louga. Une augmentation des prélèvements progressive et par pallier est observée dans le secteur s'observe de 1976 à 2011. Ils varient entre un minimum de 1 507 766 m³ en 1976 à un maximum de 22 827 812 m³ en 2004 (Figure 24). Cette augmentation est principalement liée à la croissance démographique et au développement des secteurs agricole et industriel. Cependant, une baisse notable de cette exploitation est notée en 2005 avec 16 848 909 m³ puis celle-ci augmente 2008 avant de se stabiliser au cours de ces dernières années (21 547 317 m³ en 2011).

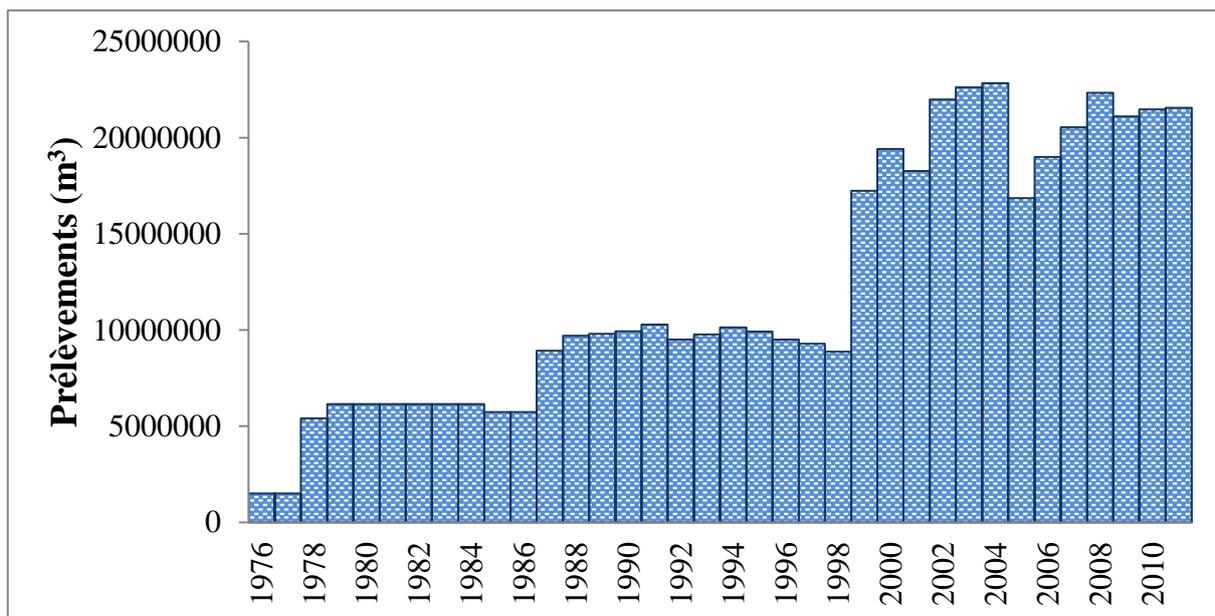


Figure 24 : Dynamique de l'exploitation dans la zone du Littoral de 1999 à 2011

Toutefois, l'exploitation réelle de la nappe reste sous-estimée car il faut prendre en considération en plus de l'exploitation pour l'AEP, les prélèvements pour l'agriculture, l'élevage et le secteur industriel qui utilisent directement la nappe pour satisfaire leurs besoins. Néanmoins, les travaux BRGM (1992) estiment les prélèvements à usage agricole entre 250 000 et 540 000 m³/j. Cependant cette valeur peut être largement sous-estimée avec la forte croissance démographique et le développement du secteur extractif (ICS et Diogo), agricole et agroindustriel.

III.3.2.4. Caractéristiques hydrochimiques

La minéralisation des eaux varie dans de fortes proportions en fonction des différents aquifères considérés (Noël, 1978) et permet une classification des eaux selon les aquifères. Elle montre que le résidu sec moyen était de 220 mg/l en 1975 dans les sables quaternaires avec des minimas sur la zone axiale et un faciès chloruré sodique. Dans les calcaires lutétiens, il est de 370 mg/l avec un faciès bicarbonaté calcique dominant. Il devient supérieur à 500 mg/l avec un faciès soit bicarbonaté calcique et magnésien, soit chloruré calcique et magnésien. Aussi, l'invasion salée se fait au Nord par le Delta du fleuve Sénégal. En effet, l'eau de mer qui durant la saison sèche pénètre dans le fleuve à 200 Km en amont de l'embouchure, est refoulée lors de la crue par les défluent où elle s'évapore et laisse des dépôts de sels (Puttalaz, 1962). Au Sud, par contre le lac Tanma est une dépression d'un bassin versant d'environ 400 Km² où les dépôts de sel s'accumulent par reprise évaporatoire. Des faciès hydro-chimiques diversifiés ont été identifiés dans le secteur avec la proximité de l'aquifère des calcaires lutétiens à l'Est et de l'Océan à l'Ouest (Kane, 1995). Ces travaux ont confirmé le rôle des apports marins dans la salinisation des eaux proches du littoral. En effet, elles montrent une contamination marine des eaux côtières qui présentent ainsi des concentrations en chlorures les plus élevées. Cette étude a aussi mise en évidence que la minéralisation des eaux ne montre pas une augmentation dans le sens de l'écoulement. Les variations des teneurs en ions majeurs ont confirmé que l'évolution de la minéralisation est liée à la plus ou moins grande proximité du littoral et l'activité anthropique. Les teneurs élevées en nitrates sont localisées dans les vergers et plantations de la zone humide des Niayes situés le long du littoral où des activités agricoles sont pratiquées durant presque toute l'année (Kane, 1995). Par ailleurs, les concentrations élevées en fer observées sur quelques points de mesure sont associés d'une part au problème de corrosion du matériel des pompes manuelles et d'autre part aux faciès lithologiques (dunes rouges ogoliennes) présents dans la zone. L'indice de déséquilibre chloro-alkalin signale la présence des argiles en proportions variables au niveau des dépôts quaternaires et favorise des processus de minéralisation comme des échanges de base principalement dans les zones dépressionnaires. Cependant, cette étude a été faite il y a une décennie et les facteurs naturelles anthropiques ont fortement augmenté dans le secteur. Vu l'importance socio-économique de la zone, les changements climatiques et environnementaux, nous allons nous pencher sur cette problématique dans le chapitre 3 pour faire une réévaluation de cette ressource et une étude de la variabilité dans le temps et dans l'espace de sa composition chimique.



**PARTIE II : MATERIELS
ET METHODES**

Chapitre IV : Données existantes et collecte de données complémentaires

IV.1. Acquisition des données existantes

Les données climatiques (pluviométrie, température, humidité relative, évaporation, insolation) ont été obtenues au niveau de l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM). Les relevés journaliers au niveau de neuf stations pluviométriques (Noto, Mboro, Méouane, Kebemer, Louga, Rao, Sakhal, Potou, Saint-Louis) ont été effectués au cours des hivernages successifs des trois années d'étude de 2010 à 2012. Toutefois, pour évaluer les variations du contexte climatique de la région, les chroniques de pluies annuelles depuis 1892 pour Saint Louis et 1930 pour Louga et Thiès ont été considérées. Ces données traitées dans le chapitre I du mémoire ont permis de dégager les tendances et variations climatiques suivant un gradient pluviométrique Nord–Sud où la période déficitaire depuis le début des années 70 est bien marquée avec toutefois quelques années excédentaires qui se singularisent. Les autres facteurs climatiques que sont la température, l'insolation, l'humidité relative et l'évaporation à l'échelle mensuelle montrent bien l'influence océanique à Saint Louis marquée par un adoucissement de la température et de l'insolation, et une augmentation de l'humidité relative qui ont un effet sur l'évaporation. Par contre les stations de Thiès et Louga se trouvant plus en profondeur du continent présentent des caractéristiques plus élevées.

Concernant les données hydrogéologiques, une série chronologique de données piézométriques de 1976 à 2009 a été collectée à la Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau (DGPRE). Des données de pompages de la nappe ont été obtenues à la Société Nationale des Eaux du Sénégal (SONES) de 1976 à 2011. Cette chronique concerne les ouvrages des champs de captage de Kelle, Kebemer et de la zone de Louga.

Les données satellitaires optiques et Radar ont été obtenus au Centre de Suivi Ecologique (CSE). Elles sont composées d'images SPOT 2002 de résolution 10 m et d'images Radar SRTM de 30 m résolution. Ceci nous permettra de faire une bonne caractérisation des états de surface de la zone étudiée. Des cartes topographiques ont été obtenues à la Direction des Travaux Géographiques et Cartographiques (DTGC) pour valider le modèle Numérique de Terrain extrait des images SRTM.

IV.2. Stratégie de collectes de données complémentaires

Ce chapitre décrit l'ensemble des activités mises en œuvre pour la collecte de données complémentaires durant les phases d'investigations.

PARTIE II : MATERIELS ET METHODES

Le tableau 3 résume de façon synoptique les différentes actions réalisées pour cette étude, les périodes ainsi que l'échelle spatiale de travail. Il met en évidence les quatre campagnes de terrain réalisées, l'échantillonnage des eaux (nappe, pluie et interstitielles) et des sols, la mesure des paramètres physico-chimiques, les différentes analyses effectuées sur les eaux et les sols.

La stratégie d'investigation choisie pour ces travaux de recherche comporte deux échelles: (i) une échelle régionale où les eaux souterraines ont été investigués sur un réseau de 32 points d'eau (constitués de 22 piézomètres, 8 puits, 3 forages) au cours de quatre campagnes de terrain ; (ii) une échelle locale sur 3 sites pilotes choisis suivant un gradient éco-géographique (Sud à Mboro, centre à Lompoul et Nord à Potou) pour étudier les processus de transferts hydriques et géochimiques et d'en déduire le fonctionnement des zones humides littorales. Préalablement, les données existantes sur la zone d'étude ont été compilées à partir de bases de données et de divers rapports d'étude.

PARTIE II : MATERIELS ET METHODES

Tableau 3 : Synthèse de la stratégie d'étude (SS : saison sèche, SP : saison pluie, SPP saison post-pluviale)

Opérations	2010			2011			2012			2013			2014			Sites	Echelle spatiale
	SS	SP	SSP	SS	SP	SSP	SS	SP	SPP	SS	SP	SPP	SS	SP	SPP		
Collecte de données existantes (climatiques, satellitaires, hydrogéologiques...) : ANACIM, CSE, DGPRE, SONES	X	X	X	X	X	X										Réseau d'ouvrages (Piézomètres, Puits, Forages)	Régionale
Campagnes Terrain: Echantillonnage des eaux de la nappe et mesures de paramètres in situ	X			X			X		X							Réseau d'ouvrages (Piézomètres, Puits, Forages)	Régionale
Echantillonnage des eaux de pluie		X			X			X			X					Stations pluviométriques	Régionale
Echantillonnage de sols (Tarière ZNS, Carottage,				X			X		X			X				Sites pilotes (Mboro, Lompoul, Potou)	Locale
Mesures in situ des paramètres (Conductivité, pH, Redox, Salinité, Température, Oxygène dissous)				X			X		X			X				Sites pilotes	Locale
Mesures des paramètres in situ, Installation des bougies poreuses et Tensionics et extraction des eaux interstitielles in situ)									X			X				Sites pilotes	Locale
Analyse chimiques sur eaux (souterraines, interstitielles et pluie) (Anions, Cations, COT), Teneur en eau : Profil ZNS								X								Réseau d'ouvrages (Piézomètres, Puits, Forages) / Sites pilotes	Régionale/ locale
Isotopie des eaux ² H, ¹⁸ O, T (Allemagne)							X									Réseau d'ouvrages (Piézomètres, Puits, Forages) / Sites pilotes	Régionale/ locale
Analyse des sols de ZNS Granulométrie laser, DRX, (Caen), MEB (Rouen)									X				X			Sites pilotes	Locale
Matière Organique particulière (Orléans)							X									Sites pilotes	Locale
Isotopie des sols ¹³ C et ¹⁵ N (Caen)									X				X		X	Sites pilotes	Locale
Perte au feu, Fractionnement du phosphore												X			X	Sites pilotes	Locale

IV.2.1. Echelle régionale

Quatre campagnes de mesure et d'échantillonnage ont été effectuées dont deux en fin saison sèche (début juillet 2010 et juin 2011), une en milieu de saison sèche (février 2012) et une en fin de saison humide (octobre 2012) sur un réseau d'ouvrages de 32 piézomètres, 8 puits et 3 forages (Figure 25). Au niveau de chaque point d'eau, les mesures *in-situ* relatives aux coordonnées géographiques, niveau statique et paramètres physico-chimiques (pH, Température, CE, salinité, Eh et O₂ dissous) ont été effectuées avant la collecte d'échantillons. Pour les mesures des paramètres physico-chimiques et la collecte d'échantillons, seuls les piézomètres ont été préalablement purgés ; les puits et forages n'ont pas nécessité cette dernière opération du fait que ces ouvrages étaient en exploitation. Pour les mesures de niveau statique, seuls les forages munis d'un dispositif de mesure ont été considérés. Un total de 190 données de mesures de niveau statique et 171 échantillons pour analyses chimiques sont considérés dans l'interprétation des données.

IV.2.2. Echelle locale des sites pilotes

Quatre campagnes de mesure *in situ* et d'échantillonnage des sols et des eaux ont été réalisées au niveau de trois sites pilotes choisis (Mboro, Lompoul et Potou) situés le long du littoral Nord (Figure 25). Deux campagnes en saison sèche Mai 2011 et Février 2012 et une en saison post-pluviale, Octobre 2012. Ces trois campagnes ont consisté à la réalisation de profils ZNS sur les versants et dans la zone proche du centre de chacune des trois zones humides.

Le site de Mboro a été choisi comme site atelier car il est représentatif d'une zone humide très fertile comprenant de la matière organique biodégradable et permettrait de comprendre le fonctionnement géochimique de cet écosystème particulier. Cette dernière campagne a consisté à étudier un transect de trois stations Versant, Centre et Bas-fond de cette Niaye.

IV.3. Mesures *in situ* et Méthodes d'échantillonnage

IV.3.1. Nappe

Au niveau des ouvrages, les niveaux statiques ont été mesurés et corrigés par rapport au sol pour chaque campagne en utilisant une sonde piézométrique sonore. La localisation géographique en coordonnées UTM a été préalablement mesurée au GPS pour chaque point d'eau.

Les paramètres physico-chimiques (pH, Conductivité électrique, TDS, Salinité, Potentiel Redox, Oxygène dissous, Température) ont été mesurés in situ à l'aide d'une mallette multiparamétrique (Conсор C 535). Les piézomètres ont été préalablement purgés.

Pour chaque ouvrage, trois échantillons ont été collectés dans des bouteilles polyéthylène de 250 ml, conservées dans une glacière à 4°C, le temps de la journée puis au réfrigérateur pendant 48 h maximum avant analyse en laboratoire.

IV.3.2. Eaux de pluie

Les eaux pluviales ont été collectées au niveau des 9 stations pluviométriques (Noto, Mboro, Méouane, Kébémér, Louga, Potou, Rao, Sakhal, Saint-Louis) proches des sites cibles sur deux hivernages successifs 2010 et 2011 (Figure 25). L'année 2011 a été échantillonnée intégralement alors que la campagne de 2010 n'a concerné que les mois de septembre et octobre. Le suivi s'est poursuivi pour l'hivernage 2012 juste au niveau des stations proches des 3 sites pilotes. Chaque événement pluviométrique a été échantillonné, mis en bouteille puis conservé pour des analyses chimiques et isotopiques ultérieures.

IV.3.3. Zone non saturée

L'étude expérimentale des processus de transferts hydriques et géochimiques a été effectuée au niveau de sites caractéristiques des Niayes localisés à Mboro, Lompoul et Potou. Ces trois sites pilotes ont été choisis suivant leurs positions géographiques respectives Sud, Centre et Nord, ceci pour avoir une vision globale du fonctionnement Hydro-Géochimique et Sédimentaire du système des Niayes.

La zone de Mboro localisée dans la région de Thiès/département de Tivaoune est située à 117 Km au Nord de Dakar et couvre une superficie de 548 m², soit 8,30 % de la superficie totale de la région. Elle est proche de l'océan atlantique et s'étend sur une longueur de 65 Km, de Ndeune à Lompoul. Dans cette zone, on distingue des sols de type Dior (ferrugineux tropicaux peu ou pas lessivés) qui entourent les bas-fonds et les cuvettes inter-dunaires également favorables aux cultures maraîchères et fruitières. On y rencontre souvent des marres d'eau en permanence au centre des zones humides généralement en forme de lambeaux. La profondeur de la nappe phréatique dépasse rarement 6 m. Les bas-fonds des cuvettes sont gorgés d'eau dont le niveau du plan d'eau fluctue en fonction des saisons. Les cultures maraîchères se pratiquent sur toute l'étendue de la Niaye exceptée le fond de la dépression colonisée par les Typha et rempli d'eau. On y cultive en saison sèche l'hibiscus, la tomate, les choux, la menthe. Sur les flancs, deux

PARTIE II : MATERIELS ET METHODES

types de palmier qui bordent la Niaye (cocotiers et palmiers à huile). La ville de Mboro (12 289 habitants en 2007) vit essentiellement du maraîchage et de la pêche. Au-delà de l'activité maraichère, l'industrie extractive y est également très développée avec les Industries Chimiques du Sénégal (ICS) qui exploitent les phosphates depuis les années 50 et le projet « Grande Côte Operations » (GCO) qui exploite les métaux lourds principalement le zircon et l'Ilménite depuis 2014. Le secteur touristique du fait de la proximité de l'océan commence à se développer.

Le site Lompoul localisé administrativement dans le département de Kébémér - région de Louga (262.609 hbts en 2010 (ANDS, 2011) constitue le site pilote de la zone centrale du Littoral Nord. La localité de Loumpoul vit de la pêche, des cultures maraichères et mais également du tourisme qui est très attractif du fait de la géomorphologie de sables dunaires assimilée au « Désert de Lompoul ». Sa superficie est d'environ de 5 à 8 Km² et la hauteur des dunes varie de 2 à 8 m. L'activité maraichère est développée sur les versants de la Niaye où est pratiquée la culture de choux par contre dans le centre de la Niaye, du fait de la présence en permanence d'eau, seules les plantes halophytes et hydromorphes y persistent. Quelques palmiers se distinguent de façon parsemée ainsi que des tans dénudés (sols nus asséchées).

Le site de Potou est localisé plus au Nord département de Louga - région de Louga où vivent 357.246 habitants (ANDS, 2011). Ce village est connu pour ses activités culturelles et commerciales du fait du marché hebdomadaire qui est un des plus grands au Sénégal. Sa forte production d'oignons représente 80 % des volumes commercialisés dans le pays (82 000 tonnes DH, 2007 et 230 000 tonnes en 2014) avec une exportation croissante vers les villes environnantes, les pays de l'UEMOA et ceux de l'UE. A Potou, l'activité maraichère est plus développée sur les versants de la Niaye. On y cultive une quantité importante d'oignon destinée pour la consommation locale et l'exportation. La culture de la carotte, des tomates, des choux y est également pratiquée. Au centre de la Niaye, seules quelques plantes de Typha se développent là où la nappe affleure. Le phénomène de lessivage dans la Niaye se fait également ressentir mais moins intense qu'à Lompoul, il est accompagné d'un ensablement dû au déplacement des dunes très prononcé dans la zone Nord. L'alignement des cocotiers se distingue dans le même axe que le centre de la Niaye.

Ainsi, les caractéristiques distinctes des trois Niayes mettant en évidence la qualité des eaux et sols ont suscité l'intérêt d'orienter nos études vers une étude comparative les stations versants et centres de ses trois zones humides.

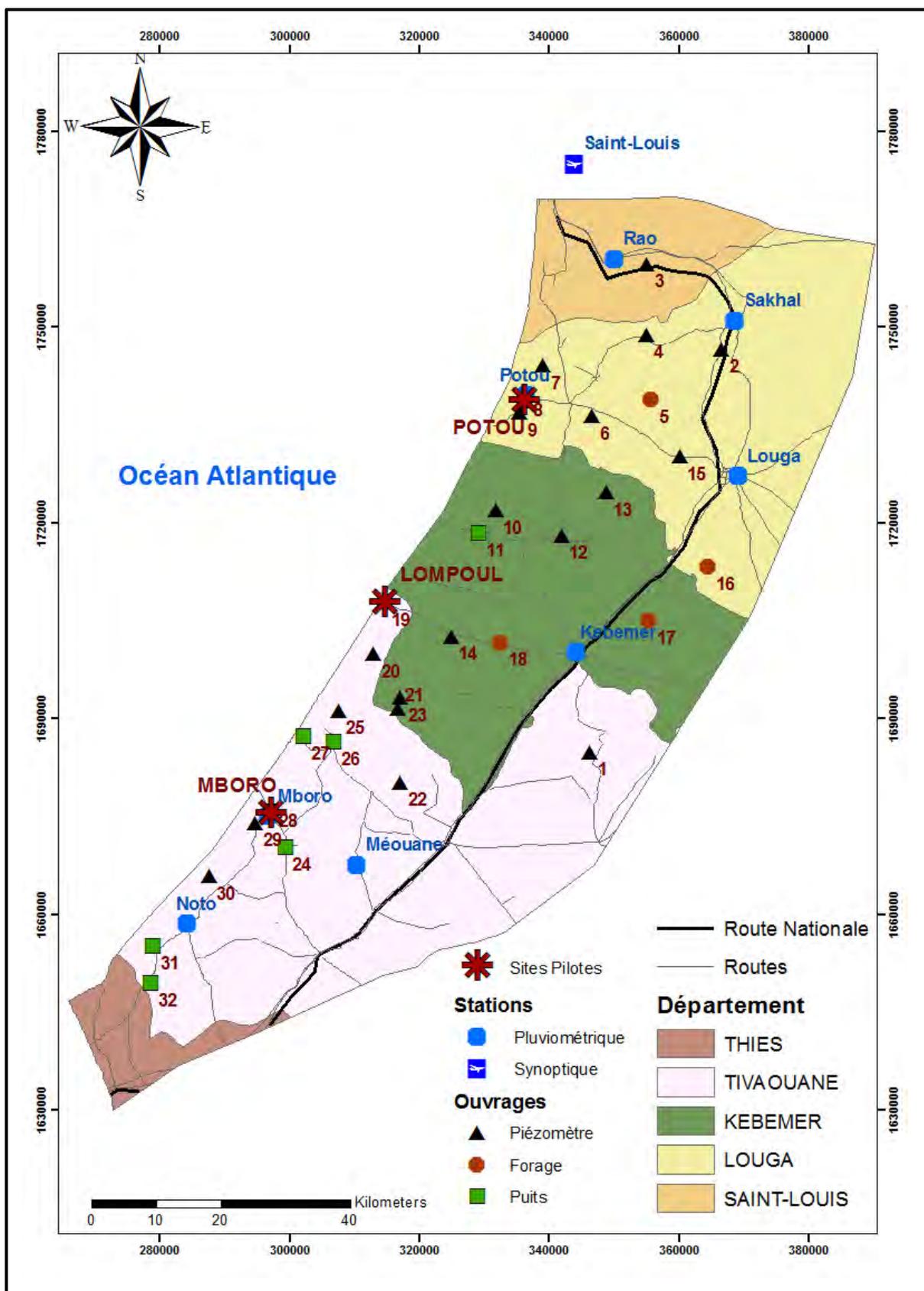


Figure 25 : Localisation des stations d'échantillonnage des eaux de pluies et de la nappe du Littoral Nord ainsi les sédiments et les eaux des zones humides de Mboro, Lompoul et Potou

IV.3.3.1. Profils de Zone Non Saturée et de sols

Les profils de ZNS dans les trois sites pilotes ont été réalisés suivant différentes méthodes en rapport avec les profondeurs d'investigations visées, les types de mesures effectuées et d'échantillons (carottes ou sols remaniés) :

- une tarière de type australien qui a permis de collecter des échantillons de sols remaniés depuis la surface du sol jusqu'à la frange capillaire au niveau des centres et versants des Niayes (Figure 26).
- une carottier en PVC transparent de 50 cm de longueur, percée de trous d'un diamètre de 5 mm, espacés tous les 2 cm permettent d'obtenir un profil de mesures physico-chimiques (pH, potentiel d'oxydo-réduction, température) à intervalles réguliers sur des carottes intactes sur des profondeurs de 0 à 50 cm.
- Deux demi-carottiers démontables permettent d'observer les différentes strates de sédimentation au niveau de chaque site.



Figure 26 : Schéma et illustration des mesures et échantillonnage des sols

Des investigations plus poussées ont été effectuées sur le site de Mboro du fait des caractéristiques d'une zone humide luxuriante. Des profils de ZNS ont été réalisés sur les trois stations Versant - Centre et Bas-fond. La station versant et celle de la zone centre sont distants de 10 m; la station centre et celle du bas-Fond de 6 m.

Des échantillons sur un profil de 1 m de profondeur ont été collectés avec un carottier en plexiglas. Ce dernier muni de trou à intervalles de 1 cm a permis les mesures des caractéristiques physico-chimiques (pH, T, Eh) sur la carotte. Au niveau de chaque station, trois profils distants de 1 m ont été réalisés pour avoir une bonne représentativité de la zone humide et de ses

différentes parties. Les échantillons ont été collectés par tranche de 5 cm de profondeur, emballées dans des sachets plastiques puis conservés au frais dans des glacières (Tableau 4).

Tableau 4 : Résumé du nombre d'échantillons obtenus par profil de ZNS par la méthode de Tarière

Années/ Sites pilotes (Nbres Ech)		Mboro		Lompoul		Potou		Total
Localisation	Niaye	Centre	Versant	Niaye	Versant	Niaye	Versant	157
2011	5		7	4	7	3	17	33
2012	10		20	11	16	26	15	98
2013	12	10	14					36

IV.3.3.2. Extraction des eaux interstitielles *in-situ* (Centrifugation, Lixiviation, Bougies Poreuses)

Le dispositif expérimental de bougies poreuses est constitué à chaque point d'une céramique poreuse jointe à un tube en PVC de 31 mm de diamètre de taille variable (25, 50 et 75 cm) du système SPS 200 de prélèvement des eaux interstitielles. Il contient aussi un capillaire plastique rigide reliant la bougie à une bouteille en plastique d'un litre, ayant un couvercle sur lequel est fixé un autre capillaire souple. Celui-ci permet de connecter le système à une pompe pour faire le vide dans le circuit à l'aide d'une pompe manuelle. L'implantation des bougies poreuses a été réalisée à l'aide d'une tarière manuelle. Une céramique fixée à l'extrémité d'une canne PVC creuse, est introduite dans le sol et permet l'extraction de la solution du sol. Une dépression (autour de -700 mbar) est créée à l'intérieur de la canne permettant ainsi une succion dans la céramique et une circulation forcée de la solution du sol vers l'intérieur de la canne. La solution ainsi récupérée dans la canne est ensuite transférée vers un flacon au moyen d'une pompe à vide manuelle SPS400 (Figure 27).

Avant l'introduction des bougies poreuses dans le sol, elles ont été préalablement immergées dans une solution de HCl durant 24 h afin de réduire les interactions avec les céramiques et d'empêcher le colmatage des pores, ensuite recouvert de sédiment. Puis, elles ont été introduites dans une solution de HCl 0,1N pendant 24 h avant utilisation sur le terrain.

Les investigations réalisées au niveau des sites pilotes ont consisté d'une part à installer les Bougies Poreuses et d'autre part à effectuer des opérations d'extractions d'eaux interstitielles *in-situ*. Pour cela, trois bougies poreuses ont été placés respectivement à 50, 75 et 125 cm de profondeur au niveau de chacune des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou. Après un temps

d'équilibration d'une semaine, l'extraction des eaux interstitielles le long de la zone non saturée a été réalisée par succion à travers la céramique.

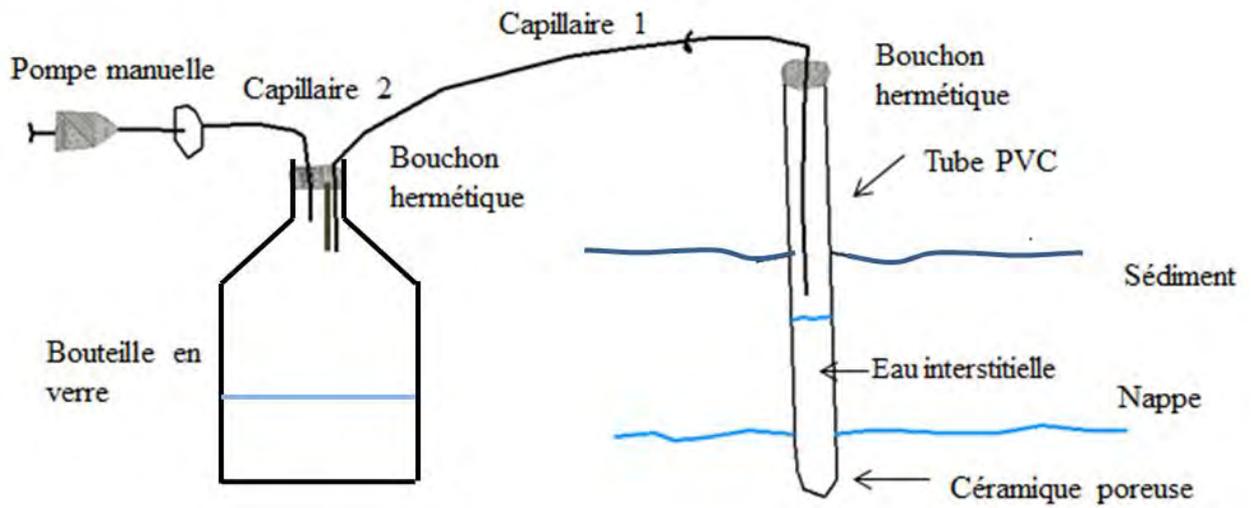


Figure 27 : Schéma d'extraction des eaux interstitielles in-situ par bougie poreuse

Chapitre V : Techniques analytiques

V.1. Teneur en eau et Porosité

V.1.1. Détermination de la teneur en eau

Elle est obtenue par la différence de masse d'un sédiment avant et après passage à l'étuve à 105°C (Rodier, 1996). Cette procédure sera modifiée en diminuant la température à 30°C pour ne pas détruire la matière organique et en augmentant le temps de séchage pouvant aller de 2 à 3 jours en fonction du type de sol. Elle se calcule par la formule :

$$\theta (\%) = \{(\text{Poids de sol humide} - \text{Poids de sol sec}) / \text{Poids de sol humide}\} * 100 \quad (1)$$

V.1.2. Méthodes de calcul de la porosité

La porosité est l'ensemble des pores vides d'un sédiment qui peuvent se remplir de fluide. C'est une grandeur physique qui conditionne les capacités de rétention d'eau dans le sol et d'écoulement dans un système aquifère.

Elle a été calculée par la formule de Burdige, 2006 adaptés pour les sédiments côtiers, marins et estuariens. Elle nécessite de connaître différents paramètres et s'écrit :

$$\phi = (m_{\text{eau}} / \beta_{\text{eau}}) / (m_{\text{eau}} / \beta_{\text{eau}} + (m_d - (S * m_{\text{eau}})) / \beta_s) \quad (2)$$

Avec :

- m_{eau} = Masse de l'eau du sédiment (g)
- β_{eau} = Masse Volumique de l'eau (kg/m^3)
- m_d = Masse du sédiment sec (g)
- β_s = Masse volumique du sédiment (kg/m^3)
- S = Salinité des sédiments (‰)

V.1.3. Extraction des eaux interstitielles

Vu la diversité des types de sols rencontrés et leur capacité de rétention, l'extraction des eaux interstitielles peut être plus ou moins difficile. Elle a été effectuée essentiellement par centrifugation au laboratoire M2C de Rouen. Pour cela, 25 g de sol ont été introduits dans des tubes coniques, ils sont par la suite mis dans une centrifugeuse à une vitesse de 2700 tr/mn

pendant 15 mn. Les eaux récupérées après centrifugation sont filtrées au besoin avec des filtres millipores 45 μm .

Par ailleurs, les échantillons des profils des versants, généralement plus sableux et en saison sèche, ont été soumis à une extraction des eaux interstitielles par lixiviation. Cette dernière consiste à prélever 50 g de sol dans un bécher de 250 ml; d'ajouter 100 ml d'eau pure milli-Q. Ces échantillons sont par la suite posés sur un agitateur multiposte pendant 3 h, puis décantés et filtrés avec un millipore 0,45 μm .

V.2. Analyses chimiques des eaux

Les ions majeurs (Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , NH_4^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-) ont été analysés par chromatographie ionique avec un appareil Dionex Methrom. Le pourcentage d'erreur inférieur à 5%.

La détermination du taux des bicarbonates a été faite par la mesure du Titre Alcalimétrique Complet (TAC) par titration colorimétrique à l'aide un indicateur l'héliantine et un acide chlorhydrique dilué à 0,1 N pour déterminer la concentration de H_3O^+ .

Le Carbone Total et le Carbone Inorganique Dissous (CID) ont été mesurés avec l'Analyseur de Carbone (TOC Shimadzu @ 5050A). Le principe est basé sur l'analyse des gaz de combustion par infrarouge non dispersif. La différence entre CT et CID permet d'obtenir le Carbone Organique Dissous total (COD).

Les ions mineurs (Mn, Al, Fe) ont été analysés par spectrophotomètre à absorption atomique (AAS, ICE 3000 SERIES, Thermo Scientific, China) sur les eaux de la nappe après filtration (filtres 45 μm) et centrifugation au laboratoire ECODIV de Rouen.

V.3. Analyses Isotopiques

V.3.1. Préparation des échantillons

V.3.1.1. Eaux

Pour les eaux de pluie, des aliquots ont été préparés par quinzaine du mois pour les trois stations Mboro, Kébémér et Potou (Juin 2, Juill 1, Juil 2, Aout 1, Aout 2, Sept 1, Sept 2). L'aliquot sera donc la somme de la même quantité de solution du 1^{er} au 15 ou du 16 au 31 de chaque mois en prenant pour référence la plus petite quantité de la série d'évènements pluvieux. Les

échantillons d'eaux interstitielles des profils de ZNS et de nappe ont été directement embouteillés.

V.3.1.2. Sols

Les échantillons de sols ont été très finement broyés. Ces échantillons en forme de poudre sèche sont pesés dans des nacelles en étain, de façon à injecter 30 à 80 μg d'azote dans le spectromètre de masse. Les échantillons ainsi conditionnés sont disposés dans un injecteur en tête de la colonne de combustion (autosampler EuroVector). Leur injection dans la colonne d'oxydation est réalisée dans un flux d'hélium en légère surpression, afin d'éviter toute contamination par le gaz carbonique et l'azote moléculaire de l'air. La combustion des échantillons a lieu au niveau de la colonne d'oxydation (oxyde de chromium et oxyde de cobalt et d'argent à une température de 1030°C). Une élévation de la température (1600°C) assurée par un apport d'oxygène conduit à une combustion totale des échantillons. A la sortie de la colonne d'oxydation, l'échantillon se trouve sous forme de N_2 , NO_x , CO_2 , CO et H_2O . La réduction des oxydes de carbones et d'azote en N_2 et CO_2 est alors assurée par le passage sur une colonne de cuivre métallique à 650°C. Le piégeage de l'eau est réalisé par une colonne contenant du perchlorate de magnésium. Enfin, les molécules N_2 et CO_2 sont séparées par une colonne de chromatographie gazeuse à 50°C. Le rapport C/N étant élevé, la portion d'échantillon qui contient le carbone est diluée en augmentant la proportion d'hélium grâce à un diluteur (GV Instrument) afin d'obtenir une quantité d'ions optimale pour la mesure par le spectromètre de masse.

V.3.2. Techniques analytiques

V.3.2.1. Isotopie des eaux ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, T)

Les analyses des isotopes stables environnementaux ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, T) sur les eaux de pluie, interstitielles et souterraines ont été effectuées à « Institute of groundwater Ecology (IGE)/ Helmholtz Center Munich, Germany. Pour les eaux de pluie, 19 échantillons collectés en 2012 au niveau des stations pluviométriques de Mboro, Kebemer et Potou ont été collectés. Au cours des campagnes Février et Octobre 2012, 18 et 27 échantillons d'eaux souterraines prélevés précisément au niveau des forages et piézomètres pompés ont été analysés. En Octobre 2013, 36 échantillons des eaux interstitielles des trois profils ZNS de Mboro et 21 échantillons d'eaux

extraites des bougies poreuses des sites pilotes de Mboro, Lompoul et Potou ont aussi été analysées.

Les isotopes stables de l'oxygène et de l'hydrogène ont été déterminés en utilisant un analyseur d'isotopes de l'eau (LS210-I, Picarro Inc., Santa Clara, CA, USA). Les deux valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ ont été déterminées par rapport aux normes internes qui ont été étalonnées à l'aide de « Vienna-Standard Mean Ocean Water (V-SMOW) ».

Les données ont été normalisées suivant Coplen (1988) comme suit :

- $d = [(RS / RV\text{-SMOW}) - 1] / 1000$, où RS représente soit rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ou $^1\text{H}/^2\text{H}$ de l'échantillon, et
- RV-SMOW est le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ou $^1\text{H}/^2\text{H}$ du V-SMOW.

L'erreur analytique est de $\pm 0,1\%$ et $\pm 1,0\%$ pour respectivement l'oxygène 18 et le deutérium. Les teneurs en Tritium ont été analysées par enrichissement électrolytique et scintillation liquide par méthode de comptage (Thatcher et *al.*, 1977). Ces valeurs sont exprimées en Unités Tritium (TU) avec une incertitude moyenne de $\pm 0,7$ TU.

Le Deutérium Excess (d-Excess) un paramètre très sensible aux conditions du milieu est calculé par la formule $d = \delta\text{D} + 8\delta^{18}\text{O}$ (Merlivat & Jouzel, 1979, Pfalh & Sodeman, 2014).

V.3.2.2. Isotopie des sols ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$)

Les analyses de carbone ($\delta^{13}\text{C}$) et d'azote ($\delta^{15}\text{N}$) des échantillons de sols de Mboro 2013 ont été réalisées au « Laboratoire de Ecophysiologie Végétale Agronomie et Nutrition N, C, S » de l'Université de Caen. Ces analyses ont été effectuées avec un analyseur élémentaire EA3000 (EuroVector) couplé à un spectromètre de masse IsoPrime (Elementor).

Le protocole met en évidence l'azote gazeux, puis le dioxyde de carbone dilué qui sont injectés dans le spectromètre de masse où ils sont d'abord ionisés. Les ions moléculaires positifs alors formés sont accélérés dans une chambre électrique, puis déviés dans un champ électromagnétique. Leur angle de déviation est directement affecté par le rapport de leur masse (m) à leur charge (z). Toutes les molécules de N_2 (puis de CO_2) ionisées étant de même charge, leur angle de déviation est donc uniquement conditionné par leur masse. Ainsi, la déviation de l'azote moléculaire de masse 28 (^{14}N) sera plus importante que celle de l'azote de masse 29 ($^{14}\text{N}^{15}\text{N}$), elle-même plus importante que celle de l'azote de masse 30 ($^{15}\text{N}^{15}\text{N}$). Les ions sont collectés par trois détecteurs. Les signaux qui en résultent sont ensuite amplifiés puis transmis au système informatique. La quantification de l'azote est réalisée en faisant la somme des signaux obtenus à partir des masses 28, 29 et 30. Après le passage l'azote, les paramètres de la

source ionique sont modifiés afin de détecter les masses 44 ($^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{16}\text{O}$), 45 ($^{13}\text{C}^{16}\text{O}^{16}\text{O}$), 46 ($^{12}\text{C}^{16}\text{O}^{18}\text{O}$). L'abondance isotopique en ^{15}N est alors calculée par l'intermédiaire du rapport des signaux 29/28 et 30/28, l'abondance isotopique en ^{13}C par le rapport des signaux 45/44 et 46/44 et des corrections sont apportées pour tenir compte du ^{18}O et du ^{17}O . Le spectromètre est calibré par rapport à des gaz de référence (N_2 et CO_2) injectés entre chaque échantillon via une Reference Gas Injector (GV Instrument).

Ces gaz ont été préalablement calibrés avec des standards IAEA (International Atomic Energy Agency) selon les références internationales air atmosphérique pour l'azote ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N} = 0,0036735$) et V-PDB (Pee Dee Belenite) pour le carbone ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C} = 0.0112372$).

V.4. Analyses sédimentologiques et géochimiques

V.4.1. Analyses granulométriques

Les échantillons de sols ont été préalablement lavés à un tamis de 2 mm pour enlever les débris et particules grossières. L'analyse de la taille et de la distribution des particules a été réalisée par diffraction Laser à l'aide d'un granulomètre de type Beckman Coulter LS230 suivant un large spectre granulométrique de la gamme des argiles aux sables (0,4 μm à 2 mm) au Laboratoire M2C de l'Université de Caen. La méthode se base sur deux modèles mathématiques : le modèle de Mie (issue des équations de Maxwell) et le modèle de Fraunhofer en fonction de la longueur d'onde de la lumière et des propriétés optiques des particules et du milieu. Le principe de l'analyse consiste à faire transiter l'échantillon sous voie aqueuse à travers deux fenêtres d'analyses :

- la première mesure s'effectue par Laser (750 nm) sur une plage de 0,4 à 2000 μm grâce à un dispositif optique de double lentille de Fourier.
- la seconde mesure s'effectue par différence de diffusion des intensités polarisées (PIDS), en diffusion latérale et en rétrodiffusion, sur une plage de 0,4 à 0,04 μm . Les intensités sont mieux différenciées selon la taille de particules par une observation sous lumière polarisée et sous 3 longueurs d'ondes différentes (450 nm, 600 nm et 900 nm).

La granulométrie Laser est bien adaptée pour l'étude sédimentologique des zones humides car, elles sont souvent constituées de faciès sablo-silteux à silto-argileux. Les tailles sont déterminées à travers l'analyse du diagramme de diffusion/diffraction de la lumière par une suspension aqueuse. Les classes granulométriques sont exprimées en % de taille : Argiles < 4 μm ; 4 μm < Silts < 63 μm , 63 μm < Sables < 2 mm. Les données sont ensuite compilées et les courbes granulométriques sont traitées avec le logiciel LS32.

La classification granulométrique adoptée de Wentworth modifiée (1982) (Tableau 5) a été utilisée.

Tableau 5 : Classification granulométrique selon Wentworth, modifiée 1982

Classe	Taille (μm)
Argile	0 - 4
Silt très fin	4 - 8
Silt fin	8 -16
Silt moyen	16 -31
Silt grossier	31- 63
Sable très fin	63 -125
Sable fin	125 -250
Sable moyen	250 - 500
Sable grossier	500 – 2000

V.4.2. Diffractomètre X

V.4.2.1. Préparation et fabrication des lames minces

La technique de préparation de lames orientées est effectuée selon la méthode d'Holtzapffel (1985) sur des échantillons bruts des profils de zone non saturée des trois sites pilotes. 20 g d'échantillon sec ont été broyé dans un mortier en agate et réduit en poudre. Les traitements appliqués sur l'échantillon permettent de le défloculer et d'éliminer toutes les particules supérieures à 2 mm. Tout d'abord, la matière organique présente a été éliminée par l'eau (20 volumes). Le reliquat est ensuite décalcifié à l'acide chlorhydrique (10 %), rincé à l'eau permutée, puis concentré successivement par centrifugation (5 minutes à 4000 tr/min) jusqu'à ce que le pH de la solution surnageante soit neutre. Le culot, dépourvu de MO et de calcite, est récupéré, puis remis en suspension dans de petits flacons. Ce culot a été enfin mis à décanter pendant 1h 40. Seuls les deux premiers centimètres de surnageant turbide de chaque flacon sont prélevés et concentrés par centrifugation (40 minutes à 4000 tr.min⁻¹). Ce nouveau culot est récupéré pour la préparation des lames orientées. La pâte est étalée en une mince couche sur une lame mince orientée une fois séchée est alors prête pour être analysée (Brunaud, 2007).

V.4.2.2. Analyse par diffractomètre RX

Cette analyse permet de décrire la composition minéralogique des éléments argileux après diffraction de leurs plans réticulaires par un faisceau de rayons X, suivant la loi de Bragg. Ces analyses ont été effectuées au Laboratoire de M2C de l'Université de Caen sur un diffractomètre de marque Philips, modèle PW 3040/00 XPert MPD/MRD. Les paramètres physiques utilisés sont l'anticathode au cobalt associée à un filtre de fer et la puissance de l'appareil 1350 W (30kV, 45 mA).

L'analyse sur les lames minces orientées de chaque échantillon va passer trois fois au diffractomètre RX. La première analyse se fait sur une lame orientée séchée à l'air ambiant pendant 1h 50 appelé Traitement au « naturel ». La seconde étape consiste à mettre la même lame au contact de vapeurs d' « Ethylène glycol » pendant 12h, afin de modifier l'espace interfoliaire des argiles gonflantes, puis est, à nouveau, analysée pendant 40 minutes. La troisième et dernière étape est celle du « Four », elle consiste à porter cette même lame à une température constante et précise de 540°C pendant 3h 30, avant une nouvelle analyse de 40 minutes au diffractomètre (Brunaud, 2007). La compilation et la comparaison des trois diffractogrammes permettent d'identifier les minéraux argileux de chaque échantillon.

V.4.2.3. Cortège des minéraux argileux

Divers minéraux argileux peuvent être identifiés tels que la Kaolinite, la Smectite, la Vermiculite, l'Illite, les Inter-stratifiés. Ils se différencient en fonction de leur pic au diffractogramme en Armstrong (Brunaud, 2007, Fall, 1986, Holtzapffel 1985).

La kaolinite notée K est un silicate d'Alumine de formule $Al_2Si_2O_5(OH)$ de groupe des Silicates et du sous-groupe des Phyllosilicates. Elle est reconnue par un pic caractéristique à 7 Å suivi d'un pic à 3,5 Å. Le traitement à l'Etylène Glycol ne modifie pas les pics qui par contre disparaissent au chauffage.

L'Illite notée I de formule chimique $(K,H_3O)(Al,Mg,Fe)_2(Si,Al)_4O_{10}[(OH)_2,(H_2O)]$ est caractérisée par une réflexion de base de 10 Å (001), 5 Å (002) et 3,5 Å ,

Les minéraux argileux tels que la Chlorite notée C, la Chlorite gonflante notée Cg, la Vermiculite notée V, les Smectites notées Sm présentes des pics autour de 14 Å (Figure 28).

Les Inter-stratifiés représentent des associations de minéraux argileux réguliers et irréguliers tels que (I - C) ou (C - Sm). Ils sont présents sur une bande de diffractogramme de 10 à 14 Å.

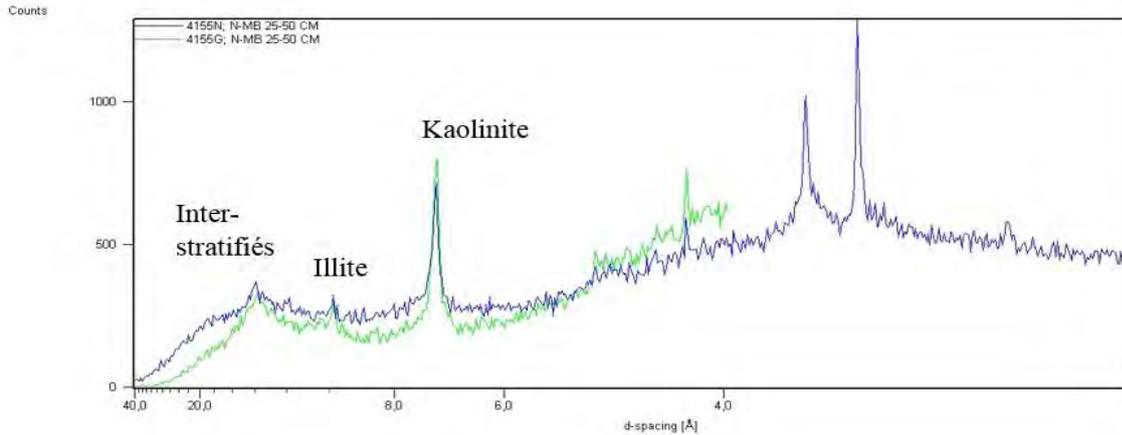


Figure 28 : Diffractogramme de l'échantillon 25-50 cm de Mboro centre

V.4.2.4. Semi-quantification des cortèges des minéraux argileux

La semi-quantification estime l'abondance relative des minéraux argileux dans le cortège. Diverses méthodes utilisées sont basées soit sur la mesure de la hauteur relative du pic de réflexion d (001) (Latouche et Maillet, 1979) agrémentée souvent par d'autres auteurs d'un coefficient correcteur selon la forme du pic (Chamley, 1971, Holtzapffel, 1985); soit sur un calcul de surface du pic de la réflexion d(001) pour chaque minéral.

Dans cette étude, la proportion relative de chaque minéral argileux a été calculée par la méthode Holtzapffel (1985). La semi-quantification a été obtenue par le calcul de surface de la réflexion d(001) de chaque minéral argileux, enregistrée sur le diffractogramme comme une somme de courbes de type Lorentzien. Les surfaces sont déterminées à l'aide du logiciel Origin. La somme des valeurs obtenues est ensuite effectuée pour chaque espèce argileuse identifiée, ramenée à 100 % et on obtient le pourcentage d'une espèce donnée pour les 100 % de minéraux argileux dans la fraction analysée. Cette adaptation de la méthode proposée par Holtzapffel (1985) améliore sensiblement la précision avec une incertitude de moins de 5%.

V.4.3. Fractionnement du Phosphore

Les formes de phosphore ont été déterminées à partir de la formule de Golterman et Booman (1988) adaptée pour des sédiments riches en MO (Mesnage et *al.*, 1995, Mesnage, 1994) à des fractions minérales (Fer, Calcium) ou des fractions organiques (solubles et résiduelles). Dans notre étude, plusieurs tests ont été effectués sur des sédiments frais, ceux traités préalablement à l'oxygène et ceux ayant subi une calcination pour enlever la matière organique. Nous retiendrons la méthode du sédiment traité préalablement à l'eau oxygène qui a donné des

résultats proches de la minéralisation globale des PO₄. Ce protocole expérimental permet d'identifier les phosphores solubles et ceux liés à la MO labile, ceux liés au Fer, au Calcium et enfin ceux à la matière organique (Figure 29).

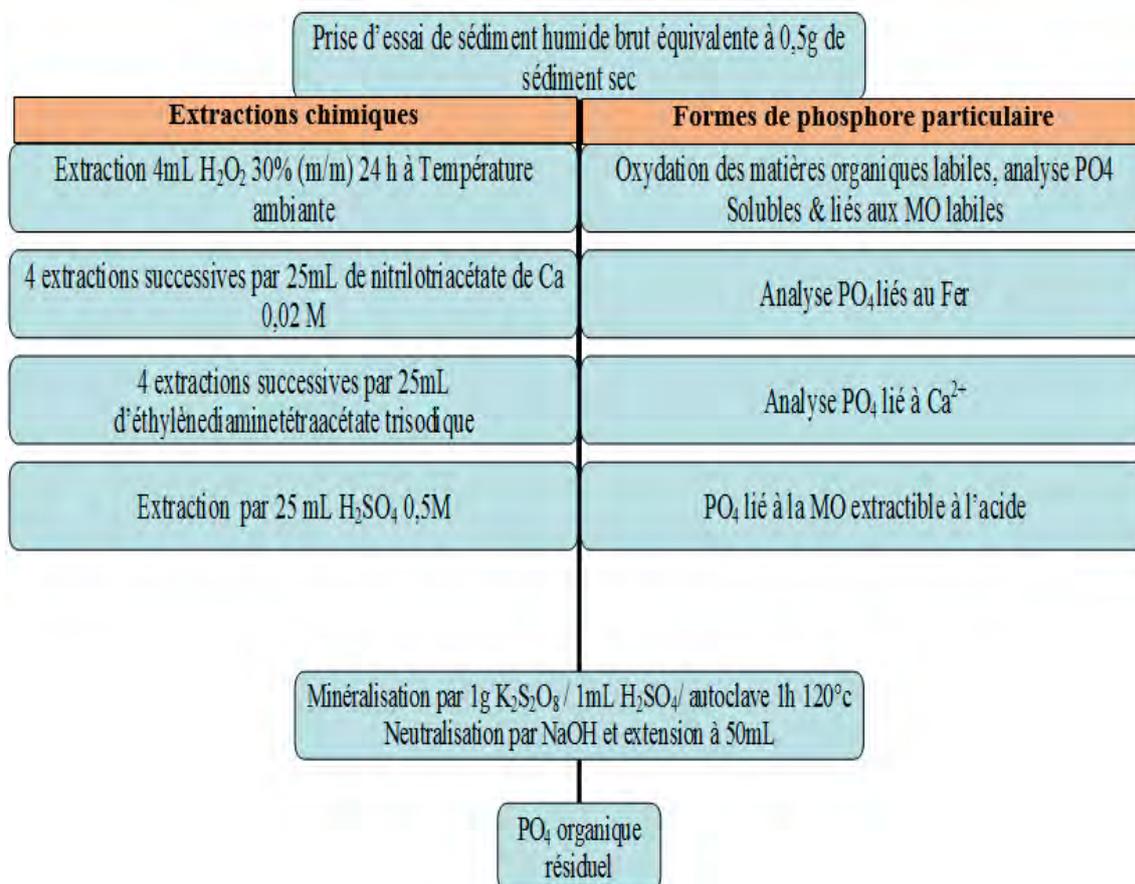


Figure 29 : Extraction des formes de phosphates (Golterman et Booman, 1988), modifiée

V.4.4. Analyse de la Matière Organique

V.4.4.1. Perte au Feu

La matière organique particulaire a été déterminée par perte au feu à 550°C sur une masse de 1g de sédiment sec. Ce sédiment est placé dans un creuset de céramique réfractaire préalablement taré puis, dans un four à moufle pour une calcination à 550°C pendant 6h. Après refroidissement pendant une nuit, le sédiment est pesé et la différence de poids entre la masse sèche et calcinée ramenée en % représente la valeur de perte au feu.

V.4.4.2. Pyrolyse Rock- Eval

La pyrolyse Rock-Eval est une technique d'évaluation de la maturité thermique et de la géochimie globale des Matières Organiques (MO). Elle permet ainsi de déterminer la quantité et la qualité des MO des sols. Elle s'est d'abord appliquée principalement pour des études de la MO géologique pour des recherches pétrolières (Espitalié *et al.*, 1985; Lafargue *et al.*, 1998). Cette technique est aujourd'hui élargie à d'autres champs d'application notamment celui de (i) la MO récente des formations sédimentaires et des sols (Di Giovanni *et al.*, 1998; Noël *et al.*, 2001; Sebag, 2002, Disnar *et al.*, 2003, Carrie *et al.*, 2012), (ii) la MO des matières en suspension (Copard *et al.*, 2006) et (iii) la MO de l'écosystème mangrove (Sakho, 2011, Marchand *et al.*, 2008, Lallier-Verges *et al.*, 1998).

V.4.4.2.1. Traitement préalable des sédiments

L'analyse des échantillons a consisté d'abord à faire sécher dans une étuve ventilée à 25° C pendant deux à trois jours en fonction du type de sol. Ils sont ensuite été broyés et conditionnés dans des piluliers avec une quantité d'environ 100 mg pour chaque échantillon qui seront acheminés à l'Institut des Sciences de la Terre (ISTO) de l'université d'Orléans.

Le Rock-Eval présente deux phases analytiques successives: la phase de pyrolyse et la phase d'oxydation (Disnar *et al.*, 2003) avec un appareil "Turbo" model RE6 pyrolyzer (Vinci Technologies). Les produits sont détectés par un détecteur à ionisation de flamme (FID), et 2 détecteurs infrarouge, pour la mesure du CO et du CO₂ issus simultanément des fours de pyrolyse et d'oxydation.

V.4.4.2.2. La phase de pyrolyse

Cette phase consiste à chauffer l'échantillon à une température programmée et graduelle pouvant aller jusqu'à 450°C et sous une atmosphère inerte (azote); et à quantifier les dégagements gazeux. Les flux gazeux générés au cours du craquage thermique de la MO sont mesurés en continu. Ils sont représentés par les signaux S1, S2, S3a et S3'a, correspondant respectivement à la quantité d'hydrocarbures libérée (S1 et S2), au CO₂ (S3a) et au CO (S3') (Figure 30).

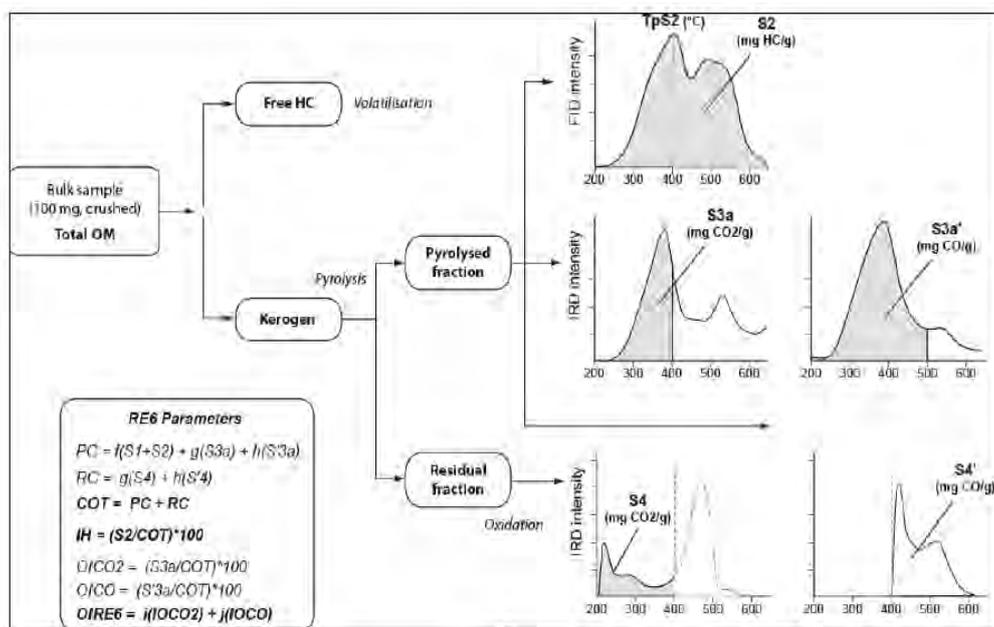
V.4.4.2.3. La phase d'oxydation

Le résidu de l'échantillon est soumis à une attaque à l'oxygène. Les effluents issus de cette réaction sont principalement du CO₂ et du CO, représentés respectivement par les signaux S4

PARTIE II : MATERIELS ET METHODES

et S4' (Figure 29). Les signaux S1 (hydrocarbures volatiles), S2 (hydrocarbures organiques), S3 (CO₂) et S4 (CO), présentés sous forme de courbes, permettent de calculer des paramètres standards (Disnar *et al.*, 2003; Marchand *et al.*, 2008) comme :

- Tmax: température à laquelle le maximum d'hydrocarbures (HC) est libéré.
- Carbone Organique Total (COT) : correspond à la somme de carbone (HC, CO, CO₂) libéré lors des phases de pyrolyse et d'oxydation.
- L'Indice d'hydrogène (IH) correspond à la quantité d'hydrocarbures libérée (S2/COT). Il est exprimé en mg HC/g COT et corrélé au rapport H/C.
- L'Indice d'oxygène (IORE6) correspond à la quantité d'oxygène (CO et CO₂) libérée lors de la phase de pyrolyse. Il est exprimé en mg O₂/g COT et corrélé au rapport O/C.
- Ces paramètres sont des marqueurs géochimiques pouvant servir à la caractérisation de la matière organique des sols.



Paramètres	Nom	Unité	Formules
Tmax	Tmax	°C	
Tp	Tpeak	°C	Tmax + 40°C
PC	Pyrolysed Carbon	wt %	$(S1+S2) * 0,083 + (S3 * 12/440) + (S3' * 12/280)$
RC	Residual Organic Carbon	wt %	$(S4' * 12/280) + (S4 * 12/440)$
TOC	Total Organic Carbon	wt %	PC + RC
HI	Hydrogen Index	mg HC/g TOC	$S2 * 100 / TOC$
OI	Oxygen Index	mg O ₂ /g TOC	$((i(O/CO_2) * 32/44) + (j(O/CO) * 16/28)) = ((S3a * 100 / TOC) + (S3a' * 100 / TOC))$

Figure 30 : Principe du Rock-Eval (RE6) et calcul des paramètres (Lafargue *et al.*, 1998 modifié Sakho, 2011)

Chapitre VI : Méthodes de traitement des données

VI.1. Traitements statistiques

Deux méthodes statistiques multivariées ont été utilisées pour l'étude de la variation spatio-temporelle de la qualité des eaux souterraines ; il s'agit de la Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) par Dendogramme et de l'Analyse en Composantes Principales (ACP). La méthode CHA en mode Q a été faite par la méthode de liaison « Ward » (Ward, 1963) qui utilise la distance euclidienne (distance en ligne droite entre deux points dans l'espace de c-dimensionnelle définie par des variables de c) pour produire des regroupements distinctifs (Güler & *al.*, 2002). Cette méthode permet d'obtenir des familles hydrochimiques statistiquement distinctes en fonction des paramètres considérés régissant le contexte géologique, anthropique et/ou climatique. L'ensemble des variables ont été normalisés par rapport à leurs scores standard (z-scores) comme décrit par Güler et *al.* (2002).

L'ACP se fait par l'approche du calcul de la variance de toutes les composantes et la détermination du degré de corrélation entre les différents paramètres et stations étudiés. L'ACP permet de déterminer l'influence des variables qui sont les paramètres considérés et celles des individus représentant les points d'échantillonnage. Cette analyse a été réalisée avec les trois premières composantes principales dont le total de la variance représente plus de 70 %.

Dans la sphère de représentation des données autant les variables que les individus peuvent être spatialisées sur deux axes factoriels et dont les valeurs varient de -1 à +1. Le tableau des matrices de corrélation met en évidence les liens entre les différentes variables chimiques. L'analyse en composantes principales est une des méthodes factorielles. Elle a permis de déterminer les familles d'éléments, de connaître les comportements, les origines et source de pollution des eaux. Elle s'applique aux tableaux de type «variables-individus», dont les colonnes sont des variables à valeurs numériques continues ou des paramètres, et dont les lignes sont des individus ou site d'observations de ces paramètres. Les proximités entre les variables s'interprètent en termes de corrélation ; les proximités entre individus s'interprètent en termes de similitudes globales des valeurs observées. Les représentations géométriques entre les lignes et entre les colonnes du tableau de données permettent de représenter visuellement les proximités entre les individus et entre les variables. Pour les variables n'ayant pas les mêmes unités ni les mêmes amplitudes, on réalisera une ACP normée en corrigeant les échelles: la somme des carrés des distances entre les couples de points est divisée par l'écart type et \sqrt{n} .

Toutes les variables sont donc centrées réduites, elles ont une même dispersion égale à 1. Ainsi transformées, elles sont comparables par mesure des écarts à la moyenne. Ces analyses ont été réalisées à l'aide des logiciels XlStat et R sur 32 individus représentant les points de mesure au cours des 4 campagnes effectuées. Neuf variables chimiques ont été prises en compte pour cette analyse (Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Na^+ , Ca^{2+} , NH_4^+ , K^+ , Mg^{2+}).

VI.2. Traitements graphiques et cartographiques

Une analyse de la fluctuation de la nappe a été effectuée afin d'évaluer la dynamique de la nappe. Des ouvrages ont été ciblés pour une étude temporelle de la piézométrie à l'aide d'un transect Sud-Nord de Mboro à Saint-Louis et trois transects Est-Ouest avec les données obtenues à la DGPRE et ceux nos campagnes de terrain respectivement au Sud, centre et Nord du Littoral Nord. L'étude des faciès chimiques et la répartition spatiale de la chimie ont été effectuées à l'aide des logiciels Diagramme par des représentations PIPER. La spatialisation de ses données ont été réalisé par le logiciel SIG, ARC GIS 9.2. Des cartes d'occupation du sol, de spatialisation des données de terrain et thématiques concernant particulièrement l'indice de végétation et d'humidité des sols seront réalisées.

VI.3. Estimation de la recharge de la nappe

La recharge d'une nappe est le processus par lequel le surplus de l'infiltration sur l'évapotranspiration s'écoule à travers la zone racinaire et continue à circuler per descendum dans la zone non saturée en direction de la nappe phréatique, où il participe au renouvellement des réserves (Freeze et Cherry, 1979). Cette réalimentation de la ressource constitue un réel problème dans nos régions à climat aride à semi-aride.

Différentes méthodes sont utilisées pour évaluer de la recharge (Tandia, 2000):

- le bilan hydrique/hydrologique;
- la méthode de fluctuations piézométriques ;
- des expériences lysimétriques ;
- des simulations numériques ;
- les méthodes géochimiques et isotopiques basées sur l'interprétation des profils.

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé cette dernière méthode.

PARTIE II : MATERIELS ET METHODES

Les chlorures représentent l'élément conservateur le plus approprié au cours du processus d'infiltration (Allison et Hugues, 1983). Ils suivent pratiquement le cheminement de l'eau et permettent ainsi de faire un traçage naturel de celle-ci. Cette technique fait appel aux études de transferts d'eau et de solutés dans la ZNS. Il existe deux méthodes d'estimation de la recharge par le bilan chlorure dans les profils (Gaye, 1990, Kaba, 2009). Cette méthode utilise la concentration de chlorure dans l'eau de pluie et celle des eaux interstitielles des sols (partie stationnaire des profils ZNS). Pour cela, le flux d'entrée de chlorure dans le sol qui est essentiellement d'origine météorique sera déterminé par l'analyse chimique des échantillons de pluies recueillies pendant les différents hivernages. La concentration moyenne de chlorure dans les eaux interstitielles a été déterminée par l'analyse chimique des eaux interstitielles des profils de ZNS réalisés. L'intérêt d'utiliser la partie stationnaire (tranche des profils ZNS où la diffusion équilibre la reprise évaporatoire) pour estimer l'infiltration efficace est qu'il peut avoir d'autres apports (d'origine marine ou continentale) augmentant ainsi les concentrations en chlorure.

Dans le cas où l'écoulement de surface est négligeable et où les eaux de pluies constituent les seuls apports aux nappes, le mouvement de l'eau est essentiellement vertical avec les profils de sols bien drainés (Allison et Hugues, 1978, Gaye, 1990).

Ainsi, en l'absence de tout apport ou fixation de chlorure par le substrat géologique, le bilan des chlorures peut s'écrire selon l'équation :

$$R \cdot C_s = P \cdot C_p$$

$$\boxed{R = (C_p/C_s) \cdot P} \quad (3)$$

R = recharge moyenne (mm)

P = hauteur moyenne des pluies (mm)

Cs et Cp les concentrations moyennes en chlorures respectives dans les eaux du profil et dans les précipitations (mg/l)

D'autre part la géochimie isotopique avec le deutérium, l'oxygène 18 et le tritium dans la ZNS aidera à la traçabilité de l'eau dans le sol et à la détermination des processus géochimiques impactant sur la recharge de la nappe.

VI.4. Bilan Hydrique

Le bilan Hydrologique a été évalué à l'échelle régionale dans les compartiments Sud, Centre et Nord régies les trois stations climatiques de Thiès, Louga et Saint-Louis. Ce bilan estime que la Pluie P qui tombe sur le sol se partage l'évapotranspiration réelle ETR, le ruissellement R, le stockage de l'eau dans le sol S, et la recharge de la nappe ou infiltration I au cours d'une période considérée. L'équation s'écrit:

$$P = ETR + R + \Delta S + I \quad (4)$$

Il est à noter que l'évapotranspiration est un facteur difficile à estimer. Nous utiliserons deux paramètres pour l'évaluer :

- L'évapotranspiration potentielle qui représente la quantité maximale d'eau pouvant être consommée par évaporation et transpiration si les réserves d'eau sont suffisantes.
- La réserve utile ou facilement utilisable (RU) du sol représente la quantité d'eau retenue dans les premières tranches du sol qui permettent de couvrir l'évaporation en saison sèche. Cette valeur varie en fonction du type de sol (Castiny, 1982).

Ce bilan a été réalisé grâce au programme WaterBudget.exe FORTRAN 90 développé au sein de l'Unité d'Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement de l'Université de Liège. Des méthodes ont été développées pour l'estimation de chacun des paramètres.

La pluie a été mesurée par des pluviomètres et est exprimée en mm de hauteur d'eau précipitée au niveau des stations ciblées dans le secteur.

Le ruissellement a été évalué à l'aide de la cartographie des pentes et des travaux antérieurs vus le manque de données hydrologiques. Dans le secteur, la majeure partie principalement la zone Centre et Nord présente une pente inférieure à 1 % donc le ruissellement peut être considéré comme très négligeable comme l'ont confirmé certains auteurs USAID (1986), Gaye (1990). Cependant, une pente variant de 2 à 12 % principalement au niveau de Horst de Ndiass dans la partie Sud-Est indiquant la présence de ruissellement dans ce secteur. Ces valeurs sont similaires aux résultats de Madioune (2012) qui trouve des valeurs moyennes maximales de 7 à 14 % au niveau du Horst, elle attribue dans le secteur un ruissellement moyen de 17 % qu'elle considère surestimé dans la partie Nord de son secteur d'étude qui correspond à notre secteur Sud Est. Ceci a permis de reconsidérer ce ruissellement moyen à une valeur de 11 %.

La Capacité de Stockage en Eau maximale (CSE) dans le sol dépend des caractéristiques granulométriques et la quantité d'eau qui y entre. La zone racinaire (jusqu'à 150 cm) sera

considérée pour évaluer ce stock d'eau disponible pour les plantes dans le sol. Les valeurs de stock d'eau calculées dans les zones humides varient de **10,3; 224,2 et 1467 mm** sur les Versants de Potou, Lompoul et Mboro respectivement. Elles varient de **652,5 ; 1612,4 et 2452,9 mm** dans la partie centre de ces trois Niayes respectives. Ces valeurs sont généralement caractéristiques des sols hydromorphes et ne seront pas considérées pour ce bilan car principalement dans les Niayes de Mboro et Lompoul la présence de Tourbe ont une forte capacité de rétention d'eau dans le sol de 80 % en moyenne avec un processus d'accumulation continue au cours du temps. Puisque la capacité de ces milieux tourbeux est sans limite. Nous considérons plutôt les valeurs de l'étude de l'USAID (1986) qui montrent une capacité de rétention des sols en général au Sénégal variant de **80 à 230 mm**. Aussi, les analyses granulométriques effectuées dans le cadre de ce travail principalement sur les versants ont été utilisées pour valider le choix de la valeur du « stock » qui peut être considérée comme dépendante des proportions relatives des différentes fractions du sol (sables, silts et argiles). Ces valeurs correspondent en moyenne une Capacité de Stock d'Eau maximale des sols (CSE) de **125 mm** pour les sols sablo-silteux comme le confirme les travaux de Nyvall et *al.*, 2002. Ce paramètre CSE varie beaucoup en fonction des mois donc de la quantité de pluie tombée et de la demande en eau des plantes présentes dans chaque milieu.

Les résultats obtenus par cette méthode sont assez sensibles au choix de la valeur maximale du « stock d'eau » dans les sols qui dépend elle-même du type de sol. Ainsi, tenant compte de ces valeurs, les calculs ont été faits en considérant des valeurs de stock de 100, 125, 150, 200 et 250 mm pour les cinq principaux types de sol du secteur d'étude. Un « stock d'eau » maximal spécifique a ainsi été estimé en fonction des groupes de types de sol.

Ainsi, les Capacités de Stock d'Eau (CSE) maximale des sols ont été évalués en fonction des types de sol du secteur regroupés en cinq familles ayant des CSE variant de 1 à 5 :

- CSE1 : 100 mm pour les sols peu évolués, les sols minéraux bruts et les sols bruns rouges sub-arides à inter-grades ferrugineux,
- CSE2 : 125 mm pour les sols ferrugineux tropicaux faiblement lessivés,
- CSE3 : 150 mm pour les sols ferrugineux tropicaux plus ou moins bien drainés,
- CSE4 : 200 mm pour les sols hydromorphes
- CSE5 : 250 mm pour les sols hydromorphes sur matériaux divers sachant qu'en fonction de la présence la présence d'argiles ou de tourbes, elle peut fortement augmenter dans le fond des dépressions des Niayes.

L'évapotranspiration réelle influence fortement l'infiltration et reste difficile à déterminer. Elle possède des valeurs souvent élevées en contexte semi-aride à aride. Cette difficulté réside dans

PARTIE II : MATERIELS ET METHODES

le fait qu'elle nécessite l'intervention d'un grand nombre de paramètres qui ne sont pas souvent disponibles. Du fait de la difficulté liée à l'estimation de l'ETR, la formule de Thornthwaite a été utilisée pour calculer l'ETP. Puis le calcul de l'ETR et de l'infiltration à partir des valeurs d'ETP. Les travaux de Dassargues (2006) indiquent que le modèle conceptuel du bilan de Thornthwaite se base sur les hypothèses ci-après :

- la zone non saturée est considérée comme un stock rechargeable en eau. Cette hypothèse permet de comprendre la complexité des écoulements en milieux poreux partiellement saturés, en modélisant cette zone par un stock ou réservoir d'eau rechargeable ;
- le stock modélisant le milieu partiellement saturé possède une capacité maximale et que cette valeur appelée capacité de stockage en eau du sol (CSE) est connue. Cette hypothèse peut se justifier par le fait que le sol ne peut pas contenir plus d'eau que celle équivalant à sa saturation ;
- Enfin, il ne peut y avoir infiltration vers la nappe ou ruissellement que lorsque cette capacité de stockage en eau du sol est satisfaite.

L'approche Thornthwaite est un modèle constitué de trois réservoirs reconstitués comme suit :

- (I) Les précipitations reconstituent le réservoir « évapotranspiration » (d'une capacité variable d'un mois à l'autre) ;
- (II) L'excédent ($P - ETP$) reconstitue le réservoir « stock en eau » du sol ;
- (III) S'il y a encore un excédent, celui-ci alimente le réservoir "recharge + ruissellement".

La méthode consiste à calculer donc l'évapotranspiration potentielle (ETP) ; la comparer avec les précipitations du mois considéré. Les conditions se présentent ainsi :

- Si $P \geq ETP$: les précipitations sont en surplus ; alors $ETR = ETP$ et l'excédent $[P-ETR]$ rechargera d'abord la capacité de stockage en eau du sol (CSE), avant de s'infiltrer ou de ruisseler ;
- Si $P \leq ETP$: les précipitations sont déficitaires ; alors la pluviométrie est insuffisante pour satisfaire l'évapotranspiration, le déficit d'eau $[ETR-P]$ sera totalement ou partiellement comblé par l'eau se trouvant dans le stock d'humidité initial du sol.

La variation de stock (ΔSi) représente la réserve de stock initiale en eau du sol. Elle est calculée via l'humidité volumique en fonction d'une profondeur donnée.

La capacité de stockage maximale en eau du sol représente deux fois la réserve utile maximale du sol saturé ($CSE = 2 RU_{max}$). Cette valeur est à satisfaire avant toute infiltration.

L'infiltration efficace **Ieff** est la part de pluie qui alimente effectivement la nappe : c'est la recharge (mm/mois ou mm/an).

La détermination de ces différents paramètres en fonction de toutes les contraintes naturelles et anthropiques actuelles permettra d'évaluer le bilan hydrologique à l'échelle régionale.

VI.5. Bilan de Masse par les ions bromures

Le bilan de masse à partir de l'ion Bromure entre deux pôles de mélange en zone côtière a permis de déterminer la fraction saline, les concentrations de mélange d'eau et le delta ionique du Bromure sur les 32 sites échantillonnés au cours des quatre campagnes

Le bilan de masse ainsi utilisé considère deux pôles de mélange dont le pôle « eau de mer » (Br : 67 mg/l) et le pôle « eau douce » représenté par la pluie (0,03 mg/l en 2012). Le bilan de masse peut ainsi se traduire selon Appelo et Postma (2005).

$$\delta_1.C_1 + \delta_2.C_2 = \delta_3.C_3 \quad (5)$$

Avec δ_1 , δ_2 , et δ_3 les fractions respectives de l'eau douce, de l'eau de mer et de l'eau de mélange représentant la nappe. $\delta_1 + \delta_2 = \delta_3 = 1$

Et C_1 , C_2 et C_3 les concentrations respectives en Br de l'eau douce, de l'eau de mer et de l'eau de mélange. La fraction d'eau de mer qui contribue à la salinisation de la nappe sera donc donnée par la formule ci-dessous :

$$\delta_2 = (C_3 - C_1) / (C_2 - C_1) \text{ exprimée en pourcentage } (6)$$

L'équation (3) peut être aussi utilisée pour connaître la contribution de l'eau de mer dans la fraction de mélange de chaque élément chimique. Le choix du bromure s'avère donc intéressant car c'est un bon indicateur de l'intrusion saline et de l'effet de l'évaporation.

La concentration du mélange conservatif (Mi_{mix}) de chaque ion entre eau de la nappe et eau de mer peut être déterminée selon l'équation :

$$Mi_{mix} = F_{mer} * mi_{mer} + (1 - F_{mer}) * mi_{nappe} (7)$$

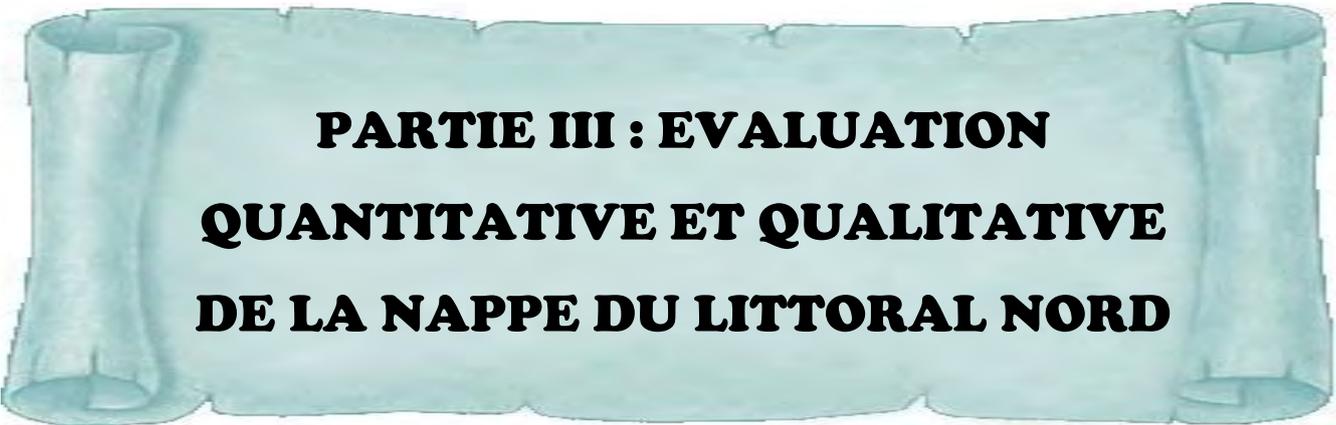
Où mi_{mer} et mi_{nappe} sont les concentrations de l'eau de mer et de la nappe de chaque élément i . L'enrichissement ou l'appauvrissement (Δmi) de chaque élément i est obtenu selon la formule:

$$\Delta mi = mi_{\text{échantillon}} - mi_{mix} (8)$$

PARTIE II : MATERIELS ET METHODES

Si la concentration du delta ionique est positive, les eaux souterraines s'enrichissent pour cet ion alors que si elle est négative, ceci indique un appauvrissement de cet ion par rapport au mélange théorique (Andersen et *al.*, 2005).

Ainsi, l'ensemble de ces techniques et analyses permettront d'une part une meilleure gestion des ressources en eaux souterraines et d'autre part une bonne compréhension du fonctionnement Hydrogéochimique de l'écosystème des zones humides.



**PARTIE III : EVALUATION
QUANTITATIVE ET QUALITATIVE
DE LA NAPPE DU LITTORAL NORD**

Les ressources en eaux souterraines représentent une partie importante du patrimoine du Sénégal. En effet, elles jouent un rôle important dans le développement socio-économique du pays à travers les usages industriels, agricoles en plus de l'AEP dans les secteurs urbain et rural. Dans la zone du Littoral nord, les ressources sont exploitées à hauteur de 110 à 130.000 m³/j (pour l'AEP des centres urbains, source SONES) en plus des prélèvements opérés dans les secteurs rural et agricole estimés à 10.222 m³/j pour la seule nappe des sables quaternaires (DGPPE, 2014). Ce système qui est caractérisé par un renouvellement qui se fait principalement par infiltration directe des eaux de pluie dans un contexte climatique très variable défini dans le chapitre précédent ... montre une baisse progressive du niveau de la nappe mise en évidence dans plusieurs ouvrages d'observation. Cette baisse serait à la fois dû au déficit de recharge et à l'exploitation croissante pour les différents usages ci-haut décrits. Des études précédentes ont montré une recharge de la nappe variant de 6 à 80 mm dans le secteur de Louga (Gaye 1990) et des impacts de prélèvements supplémentaires par modèle de 50 000 m³/j à l'horizon 2020 (Faye, 1995) sur le régime de la nappe où des rabattements de 10 m principalement à l'endroit des nouveaux forages sur l'axe routier Mékhé-Louga ainsi que l'évolution du biseau salé au Nord-Ouest. De plus, le développement de l'activité extractives dans la zone avec la création de GCO en 2014, la reprise des activités des ICS et le développement de l'agro-business depuis ces dernières années devraient certainement avoir un impact sur le régime d'écoulement du système d'autant plus que toutes ces activités se déroulent dans le flanc d'écoulement Ouest du système hydraulique. Face aux contraintes climatiques, hydrauliques et environnementales qui ont beaucoup évolué au cours de ces vingt-cinq dernières années, cette présente étude va tenter d'apporter des informations à l'évaluation quantitative et qualitative actuelle de la ressource en eau souterraine du Littoral Nord.

L'objectif de cette partie est donc de caractériser quantitativement et qualitativement les eaux souterraines du Littoral Nord puis de discuter la variabilité spatio-temporelle de l'hydrochimie. Pour cela, nous allons dégager les grandes tendances de la fluctuation de la nappe pluri-décennale et saisonnière en relation avec la pluviométrie et les prélèvements, évaluer la recharge de la nappe, estimer le bilan hydrique à l'échelle locale puis régionale du Littoral Nord. Concernant l'évaluation qualitative, nous allons caractériser la physico-chimie et l'hydrochimie de la nappe, déterminer les processus géochimiques et de salinisation qui affectent cette nappe. Un accent particulier sera mis sur l'évaluation spatiale et saisonnière de l'hydrochimie de la nappe à l'aide des outils géostatistiques afin de déterminer les familles chimiques des eaux et les processus d'acquisition de leur minéralisation.

Ces objectifs spécifiques sont les suivants :

- Evaluer l'ampleur et la typologie de la variation spatio-temporelle de la fluctuation de la nappe suivant les régimes climatiques des régions éco-géographiques du Littoral Nord ?
- Evaluer l'impact de cette variabilité spatio-temporelle de l'hydrochimie de la nappe ?
- Identifier les processus d'acquisition de la minéralisation en fonction de cette variabilité spatio-temporelle ?

La démarche suivie pour répondre à ces objectifs est basée principalement sur l'acquisition et l'analyse des données de base, des chroniques de la dynamique de la nappe et de la qualité en fonction de la variation saisonnière et du régime climatique mais également en fonction des régions éco-géographiques. Nous procéderons essentiellement suivant les gradient Nord-Sud où la variation climatique et le régime d'écoulement de la nappe sont très différents mais également suivant un gradient Est-Ouest de la côte vers l'intérieur des terres. Les données géochimiques, isotopiques seront analysés à partir d'outils conventionnels et statistiques en plus des traitements cartographiques

Chapitre VII : Evaluation quantitative des eaux souterraines

Dans ce chapitre nous allons successivement traiter les données quantitatives sur la dynamique de la nappe suivant un gradient Nord-Sud et des transects Est-Ouest respectivement au Sud, centre et Nord du secteur, étudier la réponse de la nappe à l'impact de la pluviométrie dans l'espace et dans le temps, estimer la recharge et le bilan hydrique à l'échelle locale et régionale.

VII.1. Variation temporelle et spatiale des fluctuations de la nappe

La variation du niveau de la nappe a été évaluée à partir des chroniques de relevés piézométriques à des ouvrages disposés en quatre transects. Les transects sont localisés dans la direction Nord-Sud (transect 1) et Ouest-Est (transects 2, 3, 4) respectivement au Nord, centre et Sud de la bande littorale (Figure 31).

Le transect 1 qui prend en compte les piézomètres Ndiop Sao, Fass Boye, Lompoul, Bendiouga, Keur Koura, Mouril montre un niveau piézométrique qui diminue selon un gradient décroissant Sud-Nord. En moyenne, le niveau maximum de la nappe est de 5,8 m à Ndiop Sao et le niveau minimum de - 0,5 m à Mouril de 1976 à 2012 (Figure 32). Cette côte minimale présente au cours des différentes années en majorité des valeurs inférieures au niveau 0 de la mer. Ce transect dénote en plus de la variabilité inter-annuelle, une fluctuation intra-annuelle avec la différence des saisons sèche et pluvieuse bien marquée. Ceci est observé particulièrement au niveau des sites de Lompoul, Fass Boye et Mouril qui sont les plus proches de la côte et dont les niveaux statiques sont inférieurs en moyenne à 5 m.

Au cours des 36 dernières années, une diminution moyenne du niveau de la nappe de 0,5 à 1 m est observée sur la bande Nord-Sud (Figure 32). La profondeur de la nappe par rapport au sol (PE) présente les valeurs minimales à Mboro avec en moyenne 2,9 m et maximale à Kab Gaye en moyenne 37,6 m au cours des quatre campagnes réalisées. Dans le secteur, 41 % des sites ont un niveau statique inférieur à 10 m généralement dans la partie Ouest, entre 10 et 20 m dans la partie centre, supérieure à 25 m dans la partie Est. Toutefois, la période 1985-1990 semble être marquée par une légère augmentation du niveau piézométrique en haute eaux particulièrement au niveau des ouvrages de Keur Coura, Mouril, Lompoul et Ndiop Sao. Dans le cas particulier du piézomètre de Mouril implanté dans un périmètre maraîcher, les remontées de l'ordre de 0,6 m en 1980, entre 1989 et 1991 entre 0,6 et 0,7 m et de 1,6 m en 2012 semblent être lié au retour à la nappe des eaux d'irrigation et une meilleure pluviométrie entre 2010 et 2012.

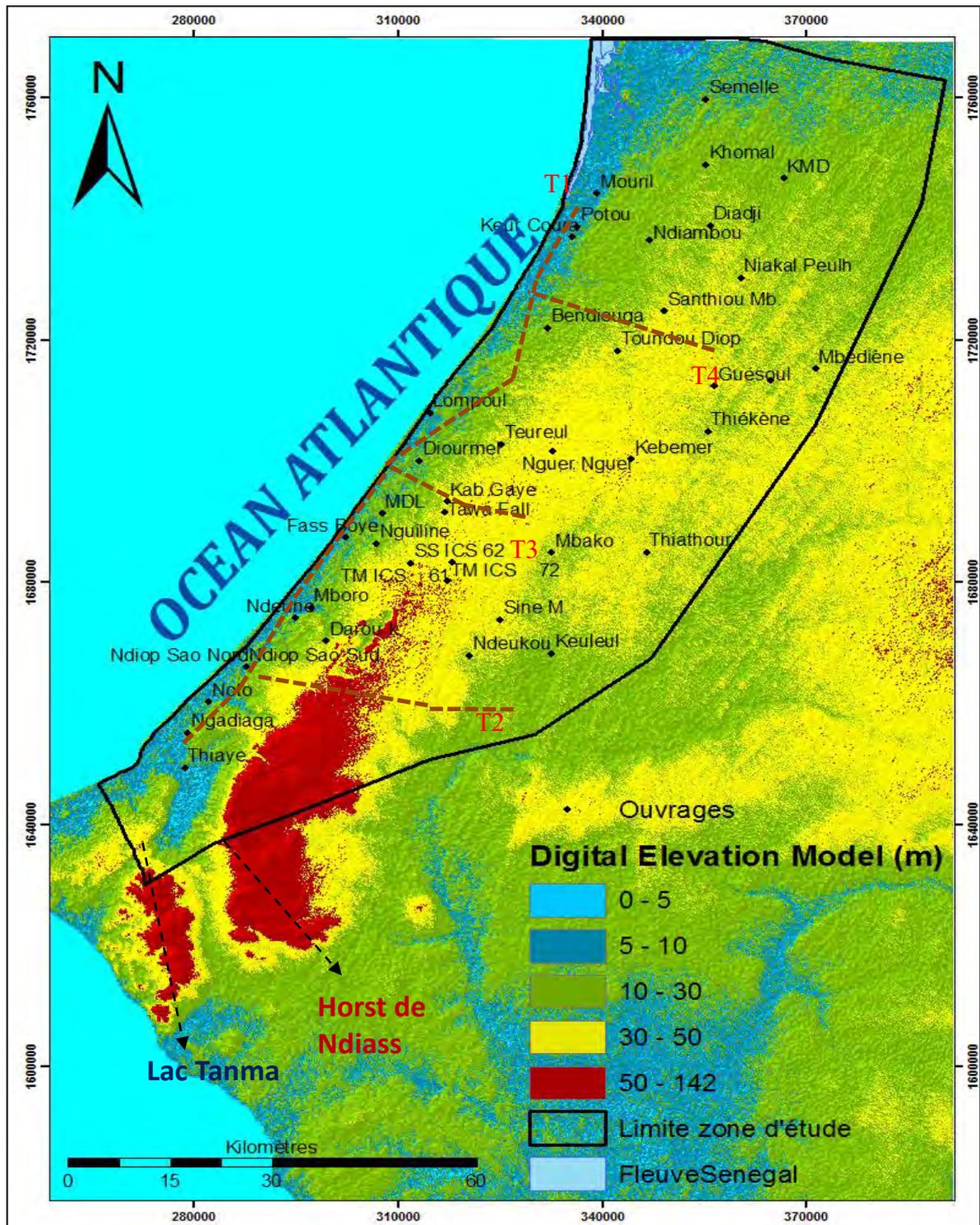


Figure 31 : Transect N-S (T1) et W-E (T2, T3 et T4) reportés sur un Modèle Numérique de Terrain du Littoral Nord

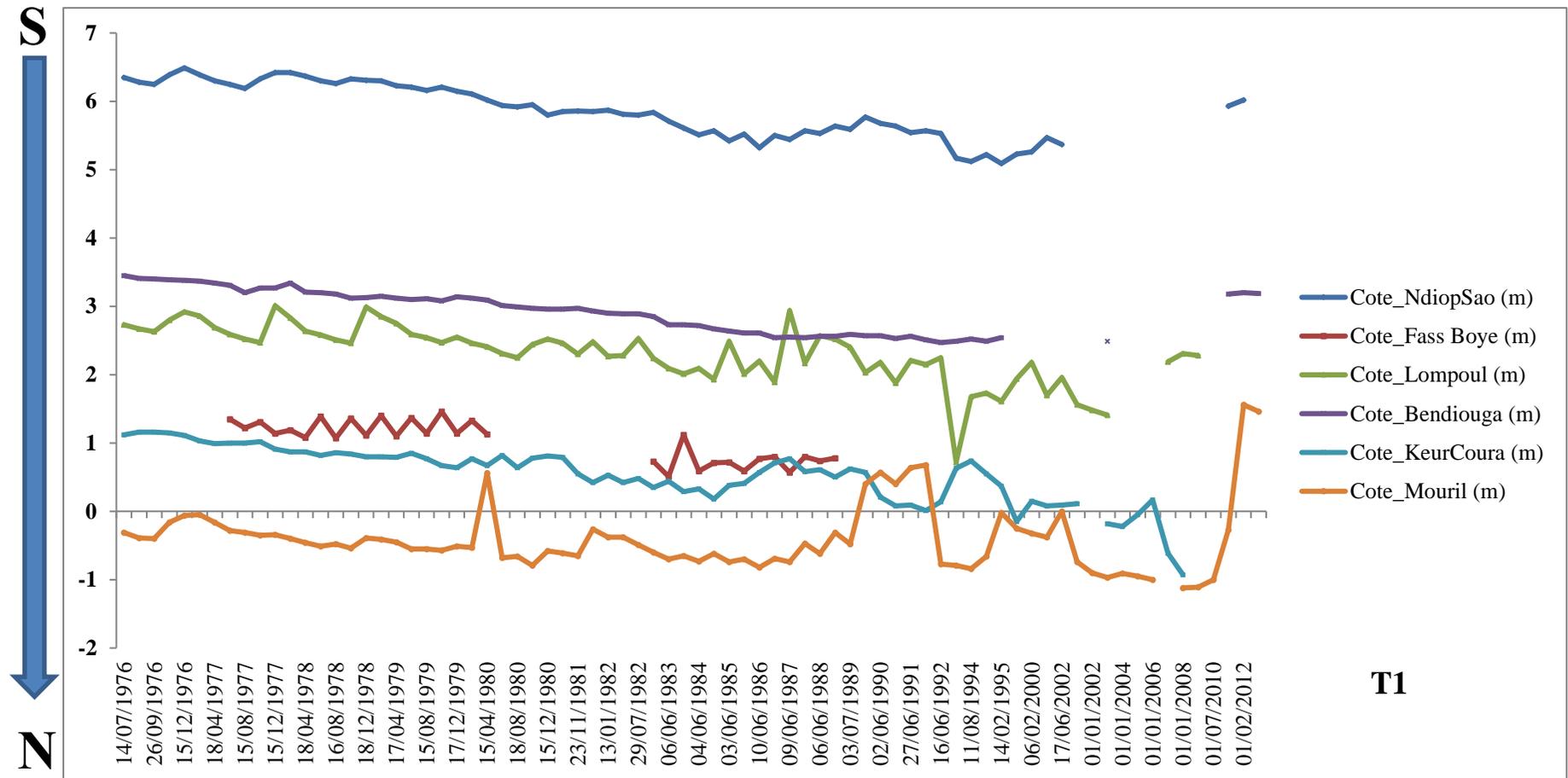


Figure 32 : Transect Nord–Sud de l’évolution de la piézométrie de la nappe du Littoral Nord 1976 à 2012 (T1)

PARTIE III : EVALUATION QUANTITATIVE ET QUALITATIVE DE LA NAPPE DU LITTORAL

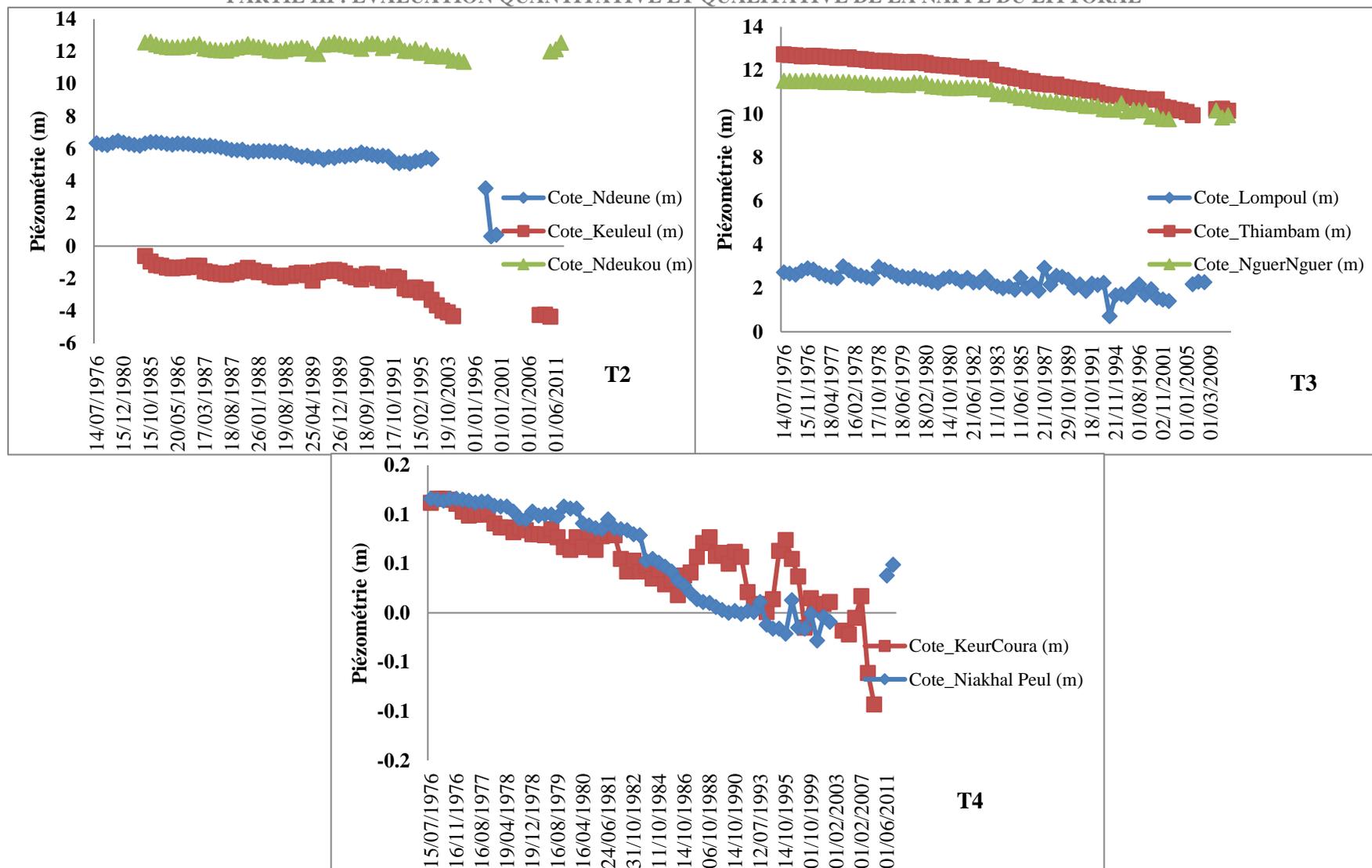


Figure 33 : Transects Est-Ouest (T2, T3, T4) de la piézométrie de la nappe du Littoral Nord de 1976 à 2012

Sur les transects Ouest-Est par contre, bien que la décroissance de la côte piézométrique soit notée au niveau de l'ensemble des ouvrages, elle se fait de manière différente en fonction de la position géographique. Le transect T2 localisé au Sud prend en compte trois ouvrages (Ndeune, Ndeukou, Keuleul localisée respectivement sur les flancs Ouest et Est de l'écoulement à partir de dôme piézométrique central). Le piézomètre Ndeukou (d'altitude $Z=38\text{m}$) située sur le flanc Est montre une côte moyenne maximale de 12 m avec une légère tendance à la baisse suivie d'une faible remontée dans les années 2010. Cette même tendance à la baisse légère est retrouvée au niveau du piézomètre de Ndeune (d'altitude $Z=31\text{ m}$) localisé sur le flanc Ouest où la côte moyenne varie entre 5 et 6 m. Par contre, l'ouvrage de Keuleul localisé dans la zone de transition de très faibles perméabilités vers les calcaires éocènes et dans la zone de dépression piézométrique est caractérisé par une variation significative de la dynamique de la nappe. Cette variation montre une baisse relativement régulière jusque vers les années 1990 pour amorcer une forte baisse jusqu'à des valeurs négatives de -4 m. Cet ouvrages en fait subit l'effet des pompages du champ captant de Kelle situé à proximité sur la route nationale.

Le transect T3 qui considère trois ouvrages disposés Est-Ouest (Nguer Nguer, Teureul, Lompoul) montre la tendance généralisée à la baisse sur les deux premiers (localisé plus à l'intérieur des terres avec des altitudes respectives de 47 et 22m) avec des côtes piézométriques moyennes entre 11 et 12 m (Figure 33). A l'opposé l'ouvrage Lompoul situé à proximité de la côte montre une réponse de la nappe à la recharge saisonnière comme c'est le cas dans la plupart des ouvrages implantés dans cette zone.

Le transect T4 au Nord es localisé principalement dans la région nord de côte piézométrique de 0,5 m en moyenne avec un gradient hydraulique tres faible. Les chroniques des deux ouvrages (Keur Koura et Niakhal Peul) montrent également une baisse régulière de 1976 à 1986 suivie d'une remontée progressive de la nappe notée entre les années 1987 et 1996 avant que celle-ci ne décroît au Niakhal Peul pour atteindre un niveau de - 0,9 m en 2012 (Figure 33).

En somme, le niveau piézométrique décroît progressivement d'environ 1 m au Sud et 0,5 m au Nord et au centre et la remontée quasi généralisée de la nappe amorcée depuis 2008 est très probablement lié au régime pluviométrique de la zone qui s'est fortement amélioré en partant d'un régime déficitaire (257 et 341 mm respectivement à Saint-Louis et Louga) à un régime excédentaire (587, 444 et 664 mm respectivement Saint-Louis, Louga et Thiès) sur une très courte période. Ce phénomène est plus beaucoup plus marqué pour les stations de Louga et Saint-Louis par rapport à celle de Thiès où elle est plus nuancée.

Cette réalimentation de la nappe s'expliquerait très probablement par l'apport des pluviométries moyennes à excédentaires au cours des années 2008 (257, 378 et 640 mm), 2009 (341, 452 et

554 mm) et 2010 (587, 444 et 664 mm) des stations respectives de Saint-Louis, Louga et Thiès. Bien que les pluies soient déficitaires sur l'ensemble des trois stations respectives (276, 336 et 486 mm), la nappe continue de se réalimenter. Ceci est dû au stock d'eau emmagasiné dans les sols le long de la zone non saturée induisant une recharge différée de la nappe. Cette relation dynamique de la nappe en fonction des conditions climatiques est évaluée dans le chapitre suivante

VII.2. Impact de la pluviométrie sur la dynamique de la nappe

L'approche utilisée pour évaluer la réponse de la nappe au régime climatique selon les zones éco-géographiques est basée sur le calcul du cumul de déficit pluviométrique au niveau des stations de Mboro, Kebemer et Saint-Louis. Le choix de ce paramètre se justifie bien dans ce contexte de variabilité climatique où les réponses de la nappe résulteraient plus des effets cumulatifs (excedents ou déficits) que des événements pluvieux individualisés. Ce phénomène s'est signalé dans presque tous les ouvrages qui ontrent un effet de recharge retarde en dehors de la saison de pluie (Kaba et al. 2016). Ainsi, pour chaque ouvrage, la côte piézométrique moyenne annuelle a été calculée pour établir la dynamique pluriannuelle de la nappe en fonction des apports/déficits cumulés des pluies annuelles de la station pluviométrique la plus proche de l'ouvrage.

Pour le calcul d'apports/déficits cumulés, nous avons d'abord calculé les indices pluviométriques centrés et réduits (équation 1) permettant de dégager les grandes tendances dans les séries chronologiques et de visualiser les périodes de déficit et d'excédent à l'échelle annuelle,

$$\text{IPS} = (\text{Pi}-\text{Pm})/\sigma \quad (9)$$

Où, IPS est l' Indice Pluviométrique Standardisé (en valeur centrée et réduite)

Pi est la pluviométrie annuelle de l'année i considérée

Pm est la pluviométrie moyenne de la série chronologique

σ est l'écart type moyen de la même série donnée.

Puis du calcul des apports/déficits cumulés de pluie

$$\text{S} = \text{IPS}_{i-1} + \text{IPS}_i \quad (10)$$

Où S : Somme du cumul des pluie

IPS_{i-1} : Indice pluviométrique standardisé de l'année i-1

IPS_i : Indice pluviométrique standardisé de l'année i

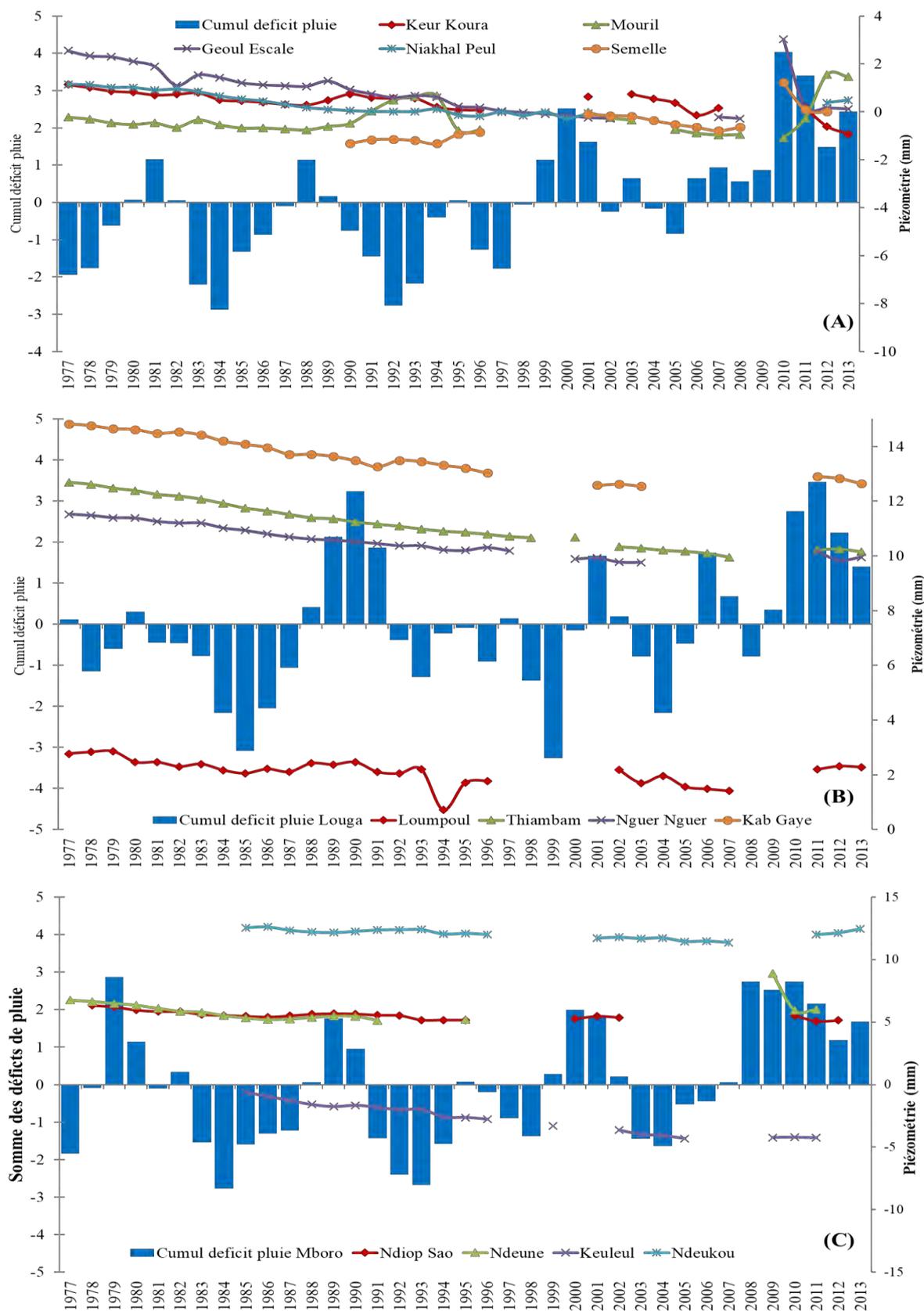


Figure 34 : Variabilité des cumuls de déficit pluviométriques et de la piézométrie moyenne annuelle de 1977 à 2013 dans les secteurs Nord (A), centre (B) et Sud (C)

La figure 34 nous montre successivement l'évolution des piézométrie moyennes annuelles en fonction des cumuls des pluies suivant les zones respectives du Nord (A), du centre (B) et du Sud (C).

Pour le secteur Nord, nous avons considéré pour l'évolution pluviométrique la station de Saint-Louis et pour l'évolution de la nappe les piézomètre de Keur Koura, Mouril, Semelle, Niakhal Peul et Geoul Escale. Les résultats montrent pour tous les piézomètres (à l'exception de Niakhal Peul) une tendance baissière relativement constante et continue entrecoupée par des remontées retardées par rapport aux années excédentaires qui semblent plus être marquées au niveau de Mouril.

Pour le secteur centre, bien que les conditions pluviométriques soient meilleures, la tendance baissière se maintient pour les ouvrages localisés à l'intérieur des terres (Teureul et Nguer Nguer). L'ouvrage de Lompoul proche de la côte montre la même tendance à la baisse avec toutefois de légères remontées induites par la recharge saisonnière de la nappe s'observent au cours des années excédentaires.

La même tendance à la baisse continue s'observent également dans le secteur Sud pour les quatre ouvrages pris en compte dans l'analyse. Toutefois on observe une légère remontée de la nappe à partir de 2010

Ainsi, la mise en relation entre les cumuls d'apport/déficit de pluie et la réponse de la nappe sur une échelle pluri-annuelle montre une baisse généralisée de la nappe dans le secteur ponctué par des réponses retardées induites par la recharge. Ce phénomène est plus accentué dans la zone Nord avec une réponse de la nappe plus rapide après un cumul de pluie excédentaire. Cette réponse est faible dans le secteur centre et quasi-constante dans le secteur Sud. Le retour à une meilleure pluviométrie à partir des années 2010 a permis une réalimentation effective de la nappe dans tout le secteur. La proximité de la côte des piézomètres tels que Lompoul et Mouril mettent bien en évidence les réponses saisonnières de la nappe.

Globalement, les chroniques de données de niveaux piézométriques synthétisées dans le tableau 4 montrent une baisse de la nappe de 1960-2012 qui varie suivant les zones de 0,95 à 3,81 m. Cette baisse résulte des effets combinés du déficit de recharge et des pompages qui sont de plus en plus importants dans la région. Il faut surtout retenir que l'effet de la recharge est net au niveau des zones littorales du fait de la faible profondeur de la nappe où les variations saisonnières sont notées malgré la baisse généralisée.

Par contre dans le secteur central, du fait de la profondeur de la nappe qui est de plus en plus importante, les données de suivi montrent une baisse continue. Ceci est probablement lié au déficit de recharge induit par la forte reprise évaporatoire de l'eau dans la zone non saturée.

De plus, l'écart-type inférieur à 1 pour l'ensemble des données montre une variabilité de la fluctuation de la nappe qui est plus importante de la zone Sud. La valeur $H_{max} - H_{min}$ permet de déterminer la variation du niveau de la nappe au cours de ces cinquante-deux années. Le plus faible niveau de la nappe est noté au Nord au niveau de Bendiouga (0,98 m) et la remontée de la nappe la plus importante à Ndeune (3,81 m) au Sud (Tableau 6).

Ainsi, les différents comportements hydrodynamiques de la nappe confirmée par l'analyse des différents transects 1, 2, 3 et 4 déterminent l'évaluation spatio-temporelle de la nappe. Cette analyse conduit à mieux comprendre la fluctuation de la nappe tributaire de la morphologie et la lithologie de l'aquifère, des conditions climatiques telles que la pluviométrie et la reprise évaporatoire, et des conditions du milieu dans le secteur.

Tableau 6 : Paramètres hydrologiques de la piézométrie de 1960 à 2012

Paramètres	Mouril	Keur Coura	Ndiambou Fall	Nguer Nguer	Bendiouga	Ndiakhal peul	Fass Boye	Ndiop Sao	Keuleul	Ndeukou	Lompoul	Teureul	Ndeune
Piezo moy	-0,40	0,50	5,35	10,89	2,93	0,57	1,02	1,10	-2,01	12,19	2,31	11,66	0,59
Ecart type	0,49	0,40	0,59	0,56	0,31	0,49	0,29	0,60	0,89	0,28	0,42	0,85	0,54
Piezo max	1,57	1,16	6,35	11,54	3,45	1,16	1,46	2	-0,61	12,61	0,72	12,74	3,58
Piezo min	-0,97	-0,93	5,31	9,76	2,47	-0,28	0,51	0,13	-4,34	11,37	3,01	9,95	-0,23
Hmax – Hmin	2,53	2,09	1,05	1,78	0,98	1,44	0,95	1,87	3,73	1,24	2,29	2,76	3,81

VII.3. Les eaux de pluies du Littoral Nord

Dans un contexte de nappe libre, les eaux de pluie sont le principal facteur du renouvellement des eaux souterraines. La pluviométrie est un facteur très important dans les études hydrogéologiques. Dans le littoral Nord, on observe une grande variabilité des hauteurs de pluie sur l'ensemble des neuf stations pluviométriques ciblées. Les maximas pluviométriques sont enregistrés dans la zone Sud à la station Méouane 458,9 mm tandis que les minimas s'observent dans la zone Nord à Rao 274,7 mm avec en moyenne 327 mm en 2011 (Figure 35).

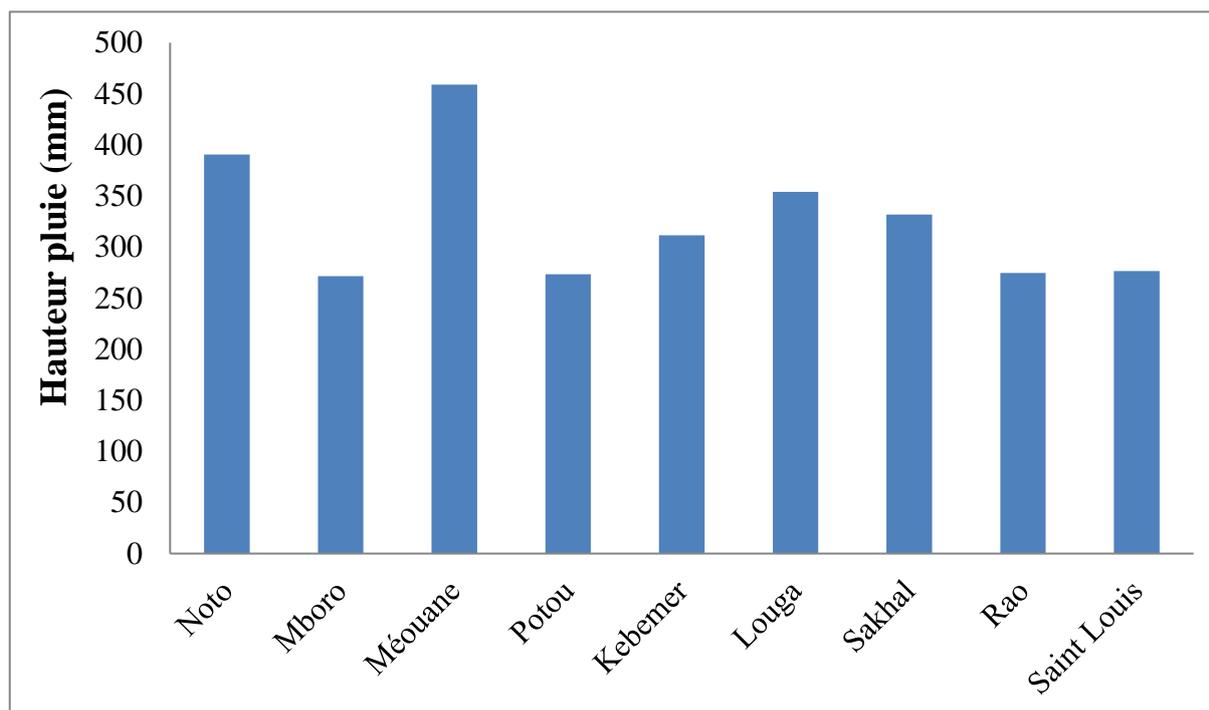


Figure 35 : Hauteurs pluviométriques au niveau des neuf stations suivis en 2011

La répartition des hauteurs pluviométriques est hétérogène dans le secteur. Ainsi, des aires d'alimentation de la nappe ont été délimités (Figure 36) à l'aide du polygone de Thiessen. Ceci permet de déterminer des zones d'influence autour de chaque station pluviométrique. Cette répartition spatiale de la pluie va ainsi avoir un impact sur la variabilité spatiale des zones de recharge de la nappe.

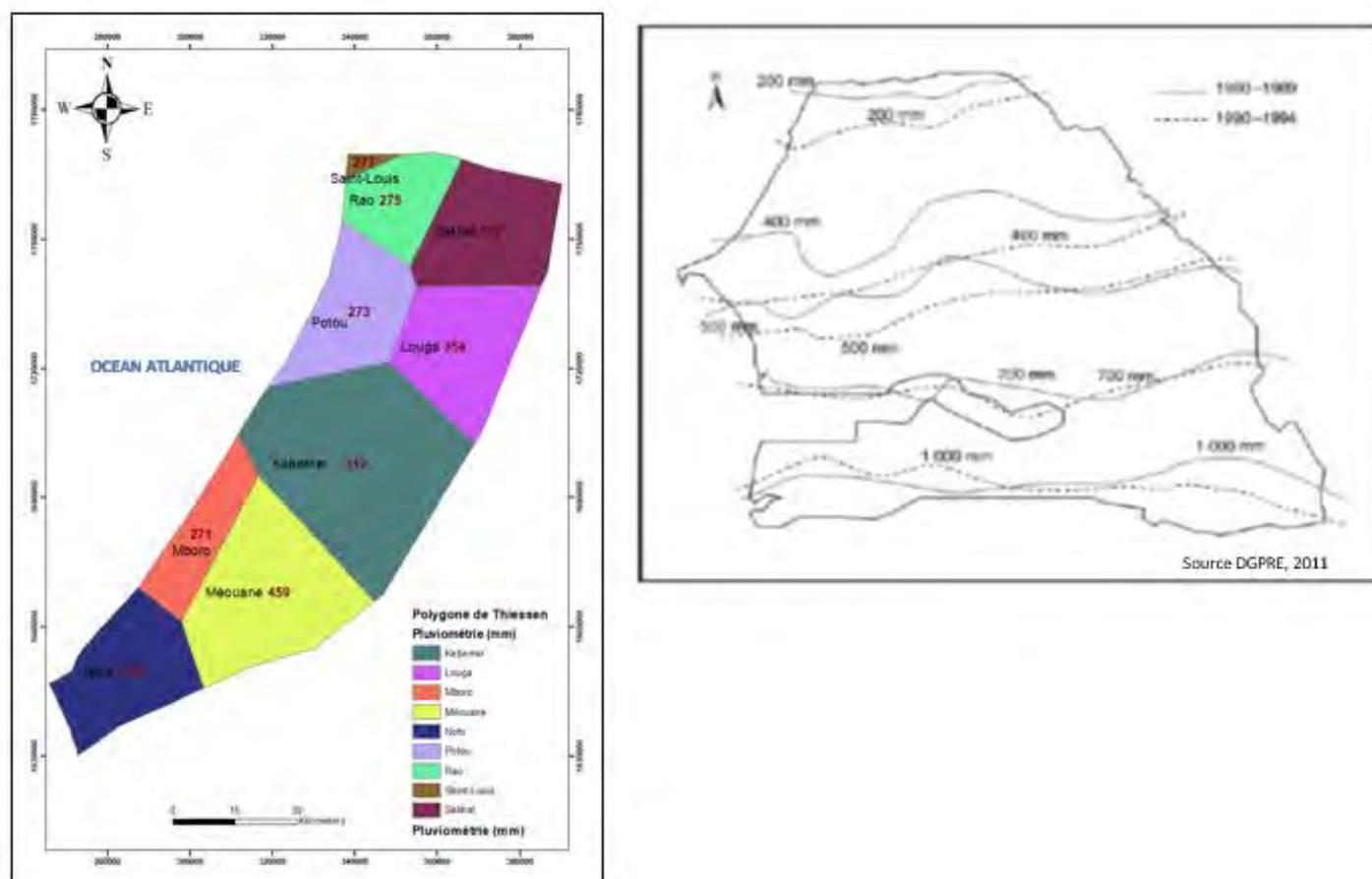


Figure 36 : Aire d'alimentation des pluies (polygone de Thiessen en 2011) – Pluviométrie du Sénégal (Isohyètes)

Les polygones réalisés par la méthode de triangulation de Delaunay utilisent les médiatrices entre deux stations pour la détermination des aires d'influence de chaque station pluviométrique (Mesić Kiš & Malvić., 2014, Dong, 2008, Chow, 1964). Ces polygones sont en phase avec les facteurs climatiques dans la régionalisation des aires d'alimentation pluviales.

Les facteurs physiques peuvent être prises en compte pour la détermination de zones potentielles de recharge de la nappe (Mall, 2016, Kaba, 2009). Cette répartition spatiale de Thiessen des précipitations et températures servira comme des facteurs dans la détermination du bilan hydrologique.

Ces données mises en cohérence avec la répartition de la pluviométrie moyenne annuelle 2000-2009 (DGPRES, 2011) confirment bien les quantités de pluies observées au niveau des stations à l'exception de la station de Mboro qui se trouve être déficitaire pour l'année 2011.

VII.4. Recharge de la nappe

L'évaluation quantitative de la ressource en eaux souterraines a été faite à partir de l'estimation de la recharge de la nappe, la détermination d'un bilan hydrique à l'échelle locale et plus globalement d'un bilan hydrologique à l'échelle régionale du secteur.

Plusieurs méthodes sont utilisées pour quantifier la recharge des nappes (Scanlon et *al.*, 2002) mais le processus majoritairement identifié consiste en une recharge directe de la nappe par infiltration des eaux de pluie après reprise par évapotranspiration et stockage dans le sol. Ainsi, l'approche la plus évidente pour estimer celle-ci devrait donc être la mesure des flux de percolation à travers la zone non saturée.

Lerner et *al.* (1990 et 1997) distingue donc :

- (i) une recharge directe issue de l'eau qui s'ajoute dans la nappe par percolation verticale directe à travers la ZNS (effet piston flow) après évaporation et évapotranspiration
- (ii) une recharge indirecte provenant de la percolation des eaux de surface ou des canaux de fissures
- (iii) une recharge localisée par accumulation de l'eau dans les zones dépressionnaires généralement issue d'une direction préférentielle d'écoulement.

Cependant, dans les régions semi-arides à arides, la recharge directe est généralement moins importante que les recharges localisées et indirecte.

Dans la zone du Littoral Nord, on distingue principalement d'une part une recharge verticale par infiltration directe des eaux de pluie et/ou des eaux de surface s'accumulant dans les dépressions; et d'autre part une réalimentation issue de l'écoulement latérale liée à la continuité hydraulique des aquifères (Thiaroye, calcaires lutétiens, paléocènes karstifiées).

A ceci s'ajoute, une recharge indirecte provenant de l'infiltration des eaux usées domestiques, industrielles et des eaux d'irrigation.

Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons essentiellement à la recharge directe par infiltration des eaux de pluies à partir de deux méthodes: le bilan des chlorures pour l'estimation de la recharge locale et la méthode de Thorthwaithe pour l'estimation de la recharge régionale. La nappe du Littoral Nord se recharge essentiellement par infiltration directe. La recharge a été ainsi calculée au niveau des trois sites pilotes ciblés (Mboro, Lompoul et Potou) sur les versants et dans la zone centre de la Niaye. Elle a été étudiée en fonction des quantités de pluie au niveau des stations pluviométriques les plus proches (Mboro, Kebemer et Potou) au 3 cours des hivernages de 2011 et 2012.

Les chlorures représentent l'élément conservatif le plus approprié au cours du processus d'infiltration (Allison et Hugues, 1983). La méthode du bilan des chlorures a été utilisée pour le calcul de la recharge au niveau des dépressions et sur les versants des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou (Tableau 5). L'ion chlorure a été mesuré dans les eaux de pluies et dans les eaux interstitielles des trois sites. Dans les eaux de pluie, il a été considéré comme signal d'entrée et dans la zone non saturée, seules les parties stationnaires du profil sont prises en compte. Ces dernières qui sont délimitées par le front d'évaporation dans sa partie supérieure sont difficilement perceptibles du fait de la faible profondeur de la nappe dans ces zones. En utilisant la formule du bilan des chlorures (cf. Formule 3, Chap II), nous avons considéré pour le signal d'entrée les valeurs moyennes des pluies de 2011 et 2012 et les teneurs en chlorure de la partie stationnaire des profils.

Dans le centre de la Niaye de Mboro, le front d'évaporation est atteint à 25 cm tandis qu'à Lompoul et Potou, le front d'évaporation est difficilement perceptible et atteint la frange capillaire (100 et 75 cm respectivement) à cause de la faible épaisseur ZNS. Sur les versants, à Mboro et Lompoul, les valeurs de chlorure se stabilisent à 125 cm, et à Potou à 75 cm.

La quantité moyenne de chlorure dans les pluies a été déterminée par l'analyse chimique des événements pluvieux des hivernages de 2011 et 2012 ; et celle des eaux interstitielles des profils réalisés ont permis d'évaluer la concentration moyenne de chlorure dans la Zone Non Saturée (ZNS).

L'analyse du Tableau 7 montre dans les pluies des taux maximums de chlorure de 15 mg/l à Mboro pour une pluviométrie annuelle de 271 mm en 2011. En 2012, cette concentration est de 9,6 mg/l pour une pluviométrie de 535 mm. Les teneurs minimales de chlorures de 6,2 et 5,5 mm sont enregistrés à Lompoul pour des pluviométries de 312 et 390 mm respectivement en 2011 et 2012. Les valeurs moyennes pour les Niayes sont estimées à 9,2 et 8,1 mg/l respectivement en 2011 et 2012.

Les taux de chlorures dans la ZNS varient entre 8806 mg/l à Lompoul en 2011 et 93 mg/l à Mboro en 2012 dans les stations centres, et entre 1370 mg/l à Potou en 2011 et 292 mg/l à Lompoul en 2012 dans les stations versants. Les trois Niayes présentent des concentrations moyennes de 4524 et 2064 mg/l dans stations centres, 1125 et 334 mg/l dans les stations versants respectivement en 2011 et 2012.

Les valeurs de recharge maximales (5,4 et 55,6 mm/an) et minimales (0,2 et 0,4 mm/an) sont enregistrées respectivement à Mboro et Lompoul avec des moyennes pour les trois Niayes de 2 et 20 mm/an respectivement en 2011 et 2012 dans les stations centres des dépressions. Sur les versants des Niayes, les taux de recharge varient entre des maximas de 6 et 14 mm/an à Mboro ;

et des minimas de 1,3 mm/an (Potou) et 7,3 mm/an (Lompoul) avec des recharges moyennes de 3 et 10 mm/an respectivement en 2011 et 2012.

Tableau 7 : Bilan des Chlorures et Calcul de la Recharge dans zones Centre (C) et Versants (V) des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou en 2011 (A) et 2012 (B)

Localités	Cl pluie (mg/l)	Pluie annuelle (mm)	Cl moyen ZNS C (mg/l)	Cl moyen ZNS V (mg/l)	Recharge Centre (mm/an)	Recharge Versant (mm/an)	% Pluie Inf N	% Pluie Inf V
Mboro A	15,0	271,4	754,7	676,7	5,4	6,0	5,9	7,8
Lompoul A	6,2	311,5	8806,3	1330,0	0,2	1,4	0,6	2,3
Potou A	6,4	273,3	4014,2	1370,0	0,4	1,3	0,1	1,1
Mboro B	9,6	535,1	92,6	364,9	55,6	14,1	10,5	2,7
Lompoul B	5,5	389,7	5184,6	291,9	0,4	7,3	0,1	1,9
Potou B	9,3	340,9	917,0	345,6	3,5	9,2	1,0	2,7

Ainsi, ces résultats montrent une hétérogénéité de la recharge au niveau des trois sites pilotes avec des teneurs fortement tributaires de la pluviométrie, des types de sols et de l'épaisseur de la ZNS. On note que plus les pluies sont importantes, moins elles sont chargées en éléments chimiques comme le chlorure. La ZNS des stations centres présente des teneurs plus importantes en chlorure que les stations versants principalement à Lompoul.

Les recharges les plus importantes sont enregistrées à Mboro dans la zone Sud avec des moyennes de 5,7 et 34,9 mm/an représentant 2,1 et 6,5 % de la pluie tombée respectivement en 2011 et 2012 (Tableau 8). Cette augmentation est certainement due à la quantité de pluie plus importante dans la zone Sud qui malgré la granulométrie fine, se condense dans les dépressions, s'infiltré progressivement et réalimente ainsi la nappe.

Les faibles taux de recharge moyens 0,8 et 3,9 mm, représentant 0,3 et 1 % de la pluie enregistrée respectivement en 2011 et 2012, sont notés dans la Niaye de Lompoul probablement

dû aux teneurs élevées en particules fines dans la dépression inter-dunaire mais également la forte présence de Tourbe dans la partie inférieure des profils ZNS ayant une capacité de rétention en eau de 80 à 90 %.

A Potou, les taux de recharge sont de 0,9 et 6,3 mm soit 0,3 et 1,9 % de la pluie tombée respectivement en 2011 et 2012. Dans cette zone, la nature des sols est surtout sableuse principalement sur les versants au Nord et l'épaisseur de la ZNS est plus importante. Les pluies sont moins abondantes et la reprise évaporatoire est plus prononcée. Ces facteurs ont donc tendance à limiter la réalimentation de la nappe. Par ailleurs, les taux de recharge au niveau du centre des Niayes de Lompoul et Potou peuvent être sous-estimés. Ceci peut se justifier par le fort taux de chlorure dans la partie stationnaire de la ZNS provenant des sources anthropiques principalement l'activité agricole intensive.

Tableau 8 : Synthèse et pourcentage de recharge par rapport aux pluies dans les zones Centre (C) et Versant (V) des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou en 2011 (A) et 2012 (B)

Sites/Années	Recharge	% pluie
	Bilan Cl	R Cl
Mboro_C_A	16	5,9
Lompoul_C_A	2	0,6
Potou_C_A	0,4	0,1
Mboro_V_A	21,2	7,8
Lompoul_V_A	7,2	2,3
Potou_V_A	3,9	1,1
Mboro_C_B	55,6	10,5
Lompoul_C_B	0,4	0,1
Potou_C_B	3,5	1,0
Mboro_V_B	14,1	2,7
Lompoul_V_B	7,3	1,9
Potou_V_B	9,2	2,7

Dans la zone des Niayes du Littoral, le secteur sud présente une réalimentation de la nappe plus importante alors que les secteurs Centre et Nord montrent un faible réapprovisionnement (cf. Tableau 6). Ceci se justifie par la capacité de rétention d'eau dans les sols et l'épaisseur de la ZNS. Il se distingue ainsi une recharge moyenne de 12 mm/an donc 3,2 % de l'eau de pluie tombée.

Par ailleurs, les hauteurs pluviométriques et les épaisseurs de ZNS influencent aussi ces valeurs de recharge de la nappe. Il s'y ajoute aussi une part importante de recharge induite issue de l'irrigation et des eaux usées domestiques et industrielles. Cette recharge difficilement quantifiable est facilitée par le type et l'épaisseur des sols, et par conséquent le temps de séjour de l'eau dans le sol.

Les résultats obtenus par le bilan des chlorures (Gaye 1990, Faye et *al.*, 1997) dans la région de Louga varient entre 4,6 et 34 mm/an sur plusieurs profils ciblés avec une moyenne de 15,2 mm/an. Grâce au bilan de Tritium (Arnanyossy and Gaye, 1992), dont les résultats se sont avérés satisfaisants, l'infiltration moyenne a été estimée à 0,85 mm/an à Louga. Faye (1995) avec son modèle conceptuel estime la recharge dans le secteur à 5 mm/an. La recharge des nappes présente ainsi une grande variabilité dans le temps et dans l'espace (Ries et *al.*, 2015).

VII.5. Estimation du bilan hydrique

L'approche d'estimation du bilan hydrique choisie est celle de la méthode Thornthwaite. Elle consiste à intégrer les différents paramètres du continuum Eau-Sol-Atmosphère. Elle permet également de définir une échelle de temps et d'espace, et de rechercher une précision dans la méthode de calcul. Il a donc été considéré trois compartiments d'étude au Sud, Centre et Nord de la zone d'étude choisis en fonction de la disponibilité des données au niveau des trois stations climatiques respectivement à Thiès, Louga et Saint-Louis sur une série de données de 1981 à 2013 (Tableau 9, Annexe IV).

Le principe de calcul doit permettre à la pluie d'alimenter en priorité l'ETR, puis de compléter la Capacité de Stockage d'Eau dans les sols (CSE) jusqu'à son maximum, et enfin d'alimenter l'infiltration et le ruissellement lorsque la CSE est satisfaite. La pluie efficace est déduite après estimation de l'évapotranspiration réelle et du stock d'eau dans le sol avant la période de calcul. Les stocks d'eau du sol (stock 1 à 5) traduits en termes de capacité de stockage d'eau des sols CSE ont été déterminées en fonction des types de sols, de la pluie et de l'ETR. Pour les sols peu évolués, les sols minéraux bruts et les sols bruns, une valeur de CSE1 de 100 mm a été considérée. Par contre pour les sols ferrugineux tropicaux faiblement lessivés, les sols ferrugineux tropicaux plus ou moins bien drainés, les sols hydromorphes et enfin les sols hydromorphes sur matériaux divers des valeurs respectives de CSE2 de 125 mm, CSE3 de 150 mm, CSE4 de 200 mm et CSE5 de 250 mm ont été adoptées. Ainsi, l'infiltration est calculée à partir de l'équation 4 (cf Partie II, VI.4).

Tableau 9 : Bilan Hydrique du compartiment Sud du Littoral Nord de la période 1981-2013 par la méthode de Thorthwaite

Thiès	Pluie (mm)	T (°C)	ETP (mm)	ETR (mm)	Stock 1	Stock 2	Stock 3	Stock 4	Stock 5	CSE 100	CSE 125	CSE 150	CSE 200	CSE 250
										I (mm)	I (mm)	I (mm)	I (mm)	I (mm)
Janvier	2,3	24,1	61,9	6,5	2,7	4,4	6,1	9,9	16,3	0	0	0	0	0,0
Février	0,3	25,3	71,7	3	0	0,2	1,3	4,8	8,2	0	0	0	0	0,0
Mars	0,1	26,1	78,8	0,1	0	0	0	0	2,5	0	0	0	0	0,0
Avril	0	25,8	75,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
Mai	0	26,6	83,1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
Juin	13,6	28,1	96,5	13,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
Juillet	80,2	28,3	98,6	67	13,2	13,2	13,2	13,2	13,2	0	0	0	0	0,0
Aout	191,5	27,8	94,1	91,3	70,8	82,8	93,1	107,8	113,1	42,6	30,6	20,3	5,6	0,3
Septembre	138,5	27,7	93	93	83,4	98,8	113,3	137,5	151,4	33	29,6	25,3	15,9	7,3
Octobre	29,3	28,6	102,2	90,7	19,5	34,1	48,7	73,1	88,8	2,4	2,4	2,4	2,2	0,4
Novembre	0,2	27,3	89,4	18,4	1,4	3,5	6,7	19,7	35,3	0	0	0	0	0,0
Décembre	0,2	25,1	69,7	1,6	0	0	0,8	4,9	10,4	0	0	0	0	0,0
	456,2		1014,3	385,1	190,9	237	283,3	370,9	439,3	78	62,6	48,1	23,7	8,0

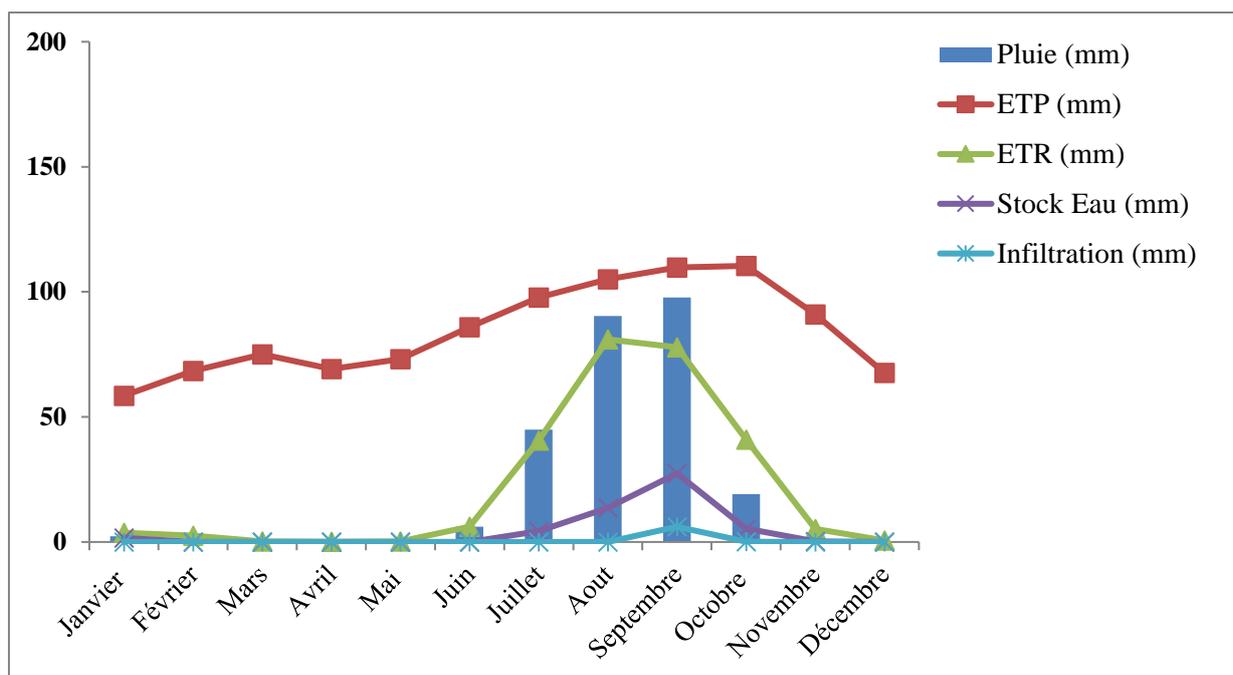
Cette analyse met en évidence la variabilité saisonnière et locale des paramètres mis en jeu le long du littoral Nord. En effet, en saison sèche de Novembre à Mai, le stock d'eau est très faible et se vide uniquement pour satisfaire l'ETR, les précipitations et l'infiltration étant nulles. En saison des pluies, de Juin à Octobre, un stock d'eau maximal est atteint généralement au cours du mois de septembre pour le secteur Nord et dès le mois d'Aout pour les secteurs centre et Sud du Littoral Nord (Figures 37-38).

Dans les secteurs Nord et Centre, l'ETP est toujours supérieure à l'ETR au cours des deux saisons cependant ces deux valeurs se rapprochent au cours des mois d'Aout et Septembre (Figure 37 A-B). Dans le compartiment Sud, le stock d'eau dans le sol est plus important à l'Ouest puis l'Est et au centre avec des valeurs approximatives d'ETR et d'ETP au cours des mois d'Aout et septembre (Figure 38 A-B-C). Au cours de ces deux mois, la pluviométrie est supérieure à l'ETP au Sud du secteur ; au centre elle présente des valeurs élevées seulement au mois d'Aout et au Nord l'ETP est au courant de toute l'année supérieure à la pluviométrie.

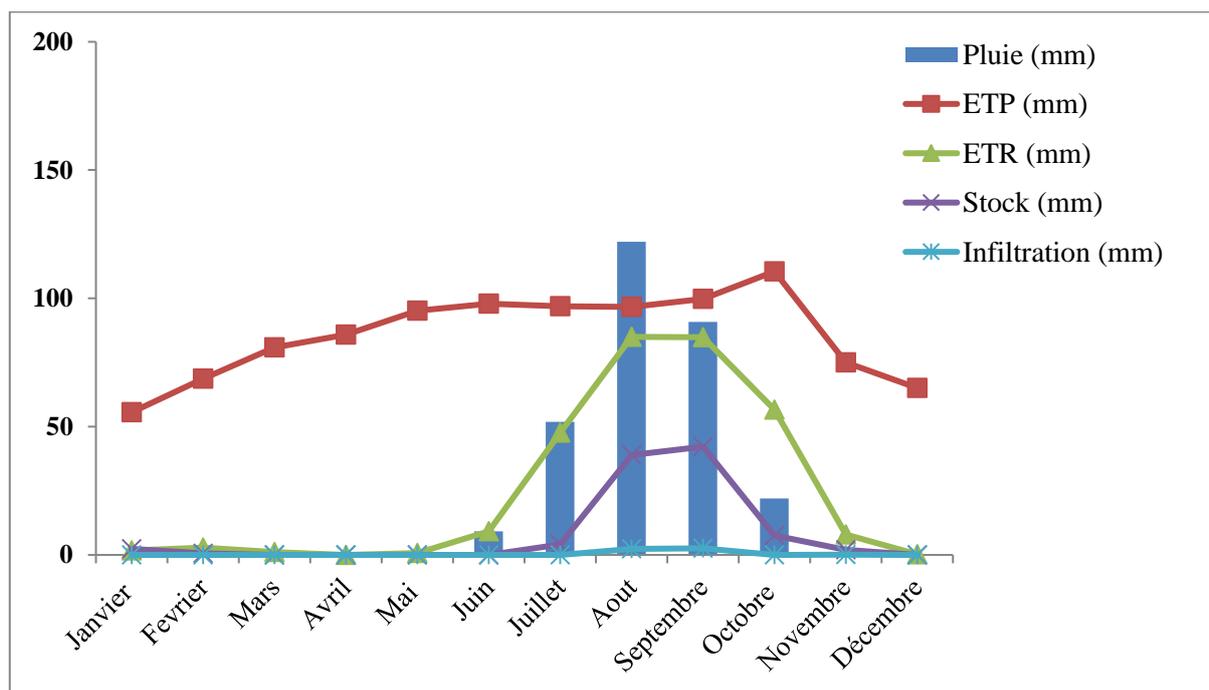
De 1981 à 2013, ce bilan hydrique présente une pluviométrie moyenne annuelle de 456, 300 et 262 mm et une ETR annuelle de 385, 293 et 259 mm respectivement pour les compartiments Sud, Centre et Nord du secteur (Tableau 9, Annexe IV). Le stock d'eau et l'infiltration sont variables en fonction de la saison et des types de sols. Le stock d'eau dans les sols varie entre 191 et 439, 118 à 84 et 53 à 81 mm, et l'infiltration de 78 à 8 mm, 10 à 0 mm et 6 à 0 mm respectivement dans les trois compartiments Sud, centre et Nord en relation avec les stations climatiques respectives de Thiès, Louga et Saint-Louis (Tableau 8, Annexe IV).

Le Tableau 10 présente les taux moyens d'infiltration en fonction des types de sols et leur capacité de stockage. On enregistre ainsi des infiltrations moyennes de 44, 4 et 3 mm dans les secteurs Sud, Centre et Nord du Littoral Nord.

Le ruissellement est principalement négligeable dans le secteur mais toutefois, il peut atteindre 11 % dans la zone Sud Est. Les sols y sont essentiellement tropicaux lessivés plus ou bien drainés, des sols hydromorphes et des sols hydromorphes sur divers matériaux, la recharge moyenne est estimée à 43, 21 et 7 mm respectivement pour ces trois types de sols de ce secteur. Ces résultats sont dans les mêmes gammes de valeurs que ceux de l'étude de Gaye, 1990. Toutefois, les travaux de Noël, 1978 ont calculé l'infiltration avec une RU = 100 mm qui donne 11, 19, 28 et 56 mm de recharge respectivement aux sites de Saint-Louis, Louga,



(A)



(B)

Figure 37 : Bilan Hydrologique mensuel par la méthode de Thornwaite dans les zones Nord

(A) et Centre (B) du Littoral Nord au Sénégal

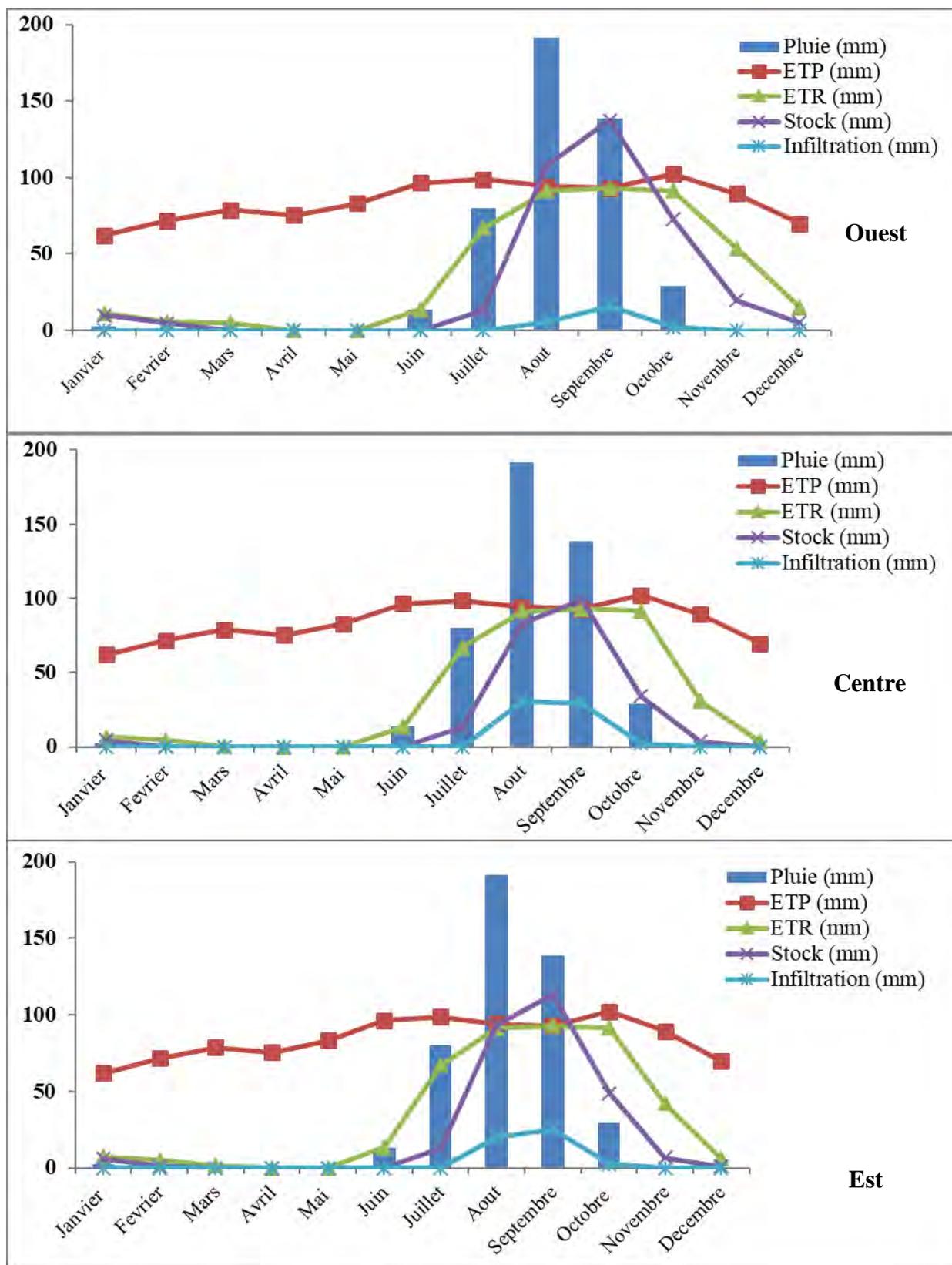


Figure 38 : Bilan Hydrologique mensuel par la méthode de Thornwaite dans la zone Sud (respectivement Ouest, Centre et Est) du Littoral Nord au Sénégal

Kebemer et Tivaouane en moyenne dans la période 1963 à 1975. Cette recharge plus importante au cours de cette dernière décennie dans le secteur Sud du Littoral Nord est certainement due au retour d'une meilleure pluviométrie.

Tableau 10 : Infiltration en fonction de types de sols du Littoral Nord

Types sol / Compartiment	Capacité de stockage d'eau max des sols (mm)	Infiltration Littoral Nord (mm)		
		Sud	Centre	Nord
Sols minéraux bruts et sols bruns	100	78	9,8	6,2
Sols ferrugineux faiblement lessivés	125	62,6	5,1	4,1
Sols ferrugineux ± drainés	150	48,1	2,9	2,7
Sols Hydromorphes	200	23,7	0,5	0,7
Sols Hydromorphes sur matériaux divers	250	8	0	0
Moyenne		44,1	3,7	2,7

Plusieurs facteurs externes peuvent influencer le bilan général de l'aquifère du Littoral :

- Le retour à la nappe des eaux d'irrigation et des eaux usées impliquant une recharge indirecte de la nappe
- Les apports latéraux entre la partie Ouest des sables quaternaires et Est des calcaires lutétiens, la nappe des sables et l'océan à l'ouest et au Nord, la nappe du Littoral Nord et celle de Thiaroye au Sud.

Le bilan global à l'échelle de la nappe fourni par des travaux antérieures de modélisation (Faye, 1995) donne une indication des échanges de flux où les entrées représentées par l'infiltration des eaux de pluie, les apports aux limites et d'emmagasinement représente un volume global de 291 540 m³/j dont 86 669 m³/j pour l'infiltration, 175 330 m³/j pour l'emmagasinement et 29 543 m³/j pour les apports aux limites. Pour les sorties sont constitués principalement par la décharge évaporatoire à 156 560 m³/j, par les limites 30 701 m³/j et les prélèvements 104 480 m³/j. Ces termes du bilan n'ont pas été réactualisés dans le cadre de ce travail mais toutefois l'apport par les eaux d'infiltration et les prélèvements devraient présenter des valeurs différentes après 25 ans d'exploitation. Mais au regard des tendances baissières de la piézométrie qui est relativement constante depuis les années 1977 jusqu'aux années 2009 pour beaucoup d'ouvrages répartis dans la zone d'étude (cf Figure 34 A-B-C), la nappe des sables

quaternaires (nappe des calcaires exclue) subit beaucoup plus l'influence de la variabilité climatique que des prélèvements. Cette baisse variant de 0,72 à 3,65 m sur 33 ans très certainement ferait varier les termes du bilan surtout en ce qui concerne les apports par infiltration et par la limite océanique. Dans ce dernier cas, les données hydrochimiques (traités dans le chapitre suivant n'indiqueraient pas une avancée significative du biseau salé dans la nappe).

Conclusion chapitre VII

Ce chapitre a conduit à l'évaluation quantitative de la ressource en eaux souterraines du Littoral Nord. En effet, cette ressource continue de diminuer suivant un gradient Sud-Nord et Ouest-Est bien marquée sur l'ensemble du secteur d'étude. Cette diminution est progressive au Sud, rapide au Centre, et enfin faible et marquée par les variations saisonnières au Nord. Ceci peut se justifier par les conditions climatiques et les prélèvements croissants dans la nappe. Les hauteurs pluviométriques varient en moyenne de 450 mm au Sud à 200 mm au Nord avec des eaux de pluies peu minéralisées sur l'ensemble de la zone.

La réalimentation de la nappe se fait principalement par infiltration directe des eaux de pluie. Elle est plus importante dans le secteur Sud que les secteurs Centre et Nord de la bande côtière. La recharge de la nappe varie sur les versants de 0,4 à 55,6 mm et dans le centre des Niayes de 0,2 à 5,4 mm avec en moyenne 12 mm/an représentant 3,2 % de la pluie tombée. Cependant, il peut y avoir une contribution latérale de l'aquifère des calcaires lutétiens avec il partage le même système hydraulique et n'est séparé d'aucune limite étanche principalement dans la zone centrale du secteur d'étude.

Le bilan hydrique à l'échelle régionale a permis de déterminer l'évapotranspiration réelle avec des valeurs moyennes de 385, 293 et 259 mm respectivement dans les compartiments Sud, Centre et Nord du Littoral Nord de 1981 à 2013. Les taux d'infiltration déterminés en fonction du type de sol varient de 78 à 0 mm avec des valeurs moyennes de 44, 4 et 3 mm dans les secteurs Sud, Centre et Nord de la bande côtière.

L'analyse des termes du bilan global par modèle établi par (Faye, 1995) et le régime de fonctionnement de la nappe caractérisée par une dynamique baissière de la nappe depuis les années 70 indiquent bien que la nappe des sables quaternaires (sens strict) subit beaucoup plus l'influence de la recharge par la pluie comparée aux prélèvements qui sont relativement faibles par rapport aux réserves de la nappe.

Chapitre VIII : Evaluation qualitative des eaux du Littoral Nord

Cette étude vise à déterminer l'hydrochimie des eaux de pluies et de la nappe du Littoral Nord. La variabilité spatio-saisonnnière de la nappe a été réalisée en utilisant de nouveaux outils géostatistiques dans un contexte actuel de croissance démographique, de changement climatique, de développement du secteur minier et agricole dans la bande côtière.

Pour ce faire, nous avons pour les pluies fait un suivi de neuf stations pluviométriques, et pour la nappe réalisé quatre campagnes de terrain dont deux en fin de saison sèche, une en mi-saison sèche et une dernière en fin de saison de pluie sur un réseau de 32 points situés le long du Littoral. Différents traitements ont été effectués sur les données physico-chimiques et chimiques dont l'analyse statistique descriptive et multivariée associées à des outils chimiques, isotopiques et cartographiques.

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'hydrochimie des eaux de pluie, évaluer la physico-chimie et l'hydrochimie sous forme synthétique (statistique et cartographique) des ions majeurs et mineurs (Fe, Mn, Al) et déterminer les processus d'altération et de salinisation de la nappe.

VIII.1. Hydrochimie des eaux de pluie

Les analyses chimiques des eaux de pluies sont portées sur des éléments majeurs. Elles montrent que ces eaux sont plus minéralisées dans la zone Sud et proche de la côte. Les teneurs en ions variant en moyenne entre 0,4 et 6,3 mg/l suivant un ordre d'importance $Cl > NO_3 > Na > Ca > SO_4 > K > NH_4 > Mg > PO_4$ (Tableau 11).

En ce qui concerne l'ion chlorure utilisé dans le bilan des chlorures, les teneurs moyennes varient en 2011 de 1,4 mg/l à Saint-Louis à 15 mg/l à Mboro avec en moyenne 6,3 mg/l pour les neuf stations du Littoral Nord. Toutefois, les particularités sont notées au niveau de chaque station pluviométrique. Les stations de Mboro, Louga et Noto présentent des taux de chlorure respectivement de 15, 10 et 8 mg/l supérieurs à la moyenne de 6,3 mg/l dans la bande littorale Nord (Tableau 11). Les stations Kebemer et Potou enregistrent des valeurs en NO_3^- de 13 et 11 mg/l respectivement. Les teneurs en sulfates et sodium sont plus importantes à Mboro et l'abondance de l'ammonium dans les eaux de pluies est notée à Noto. Les ions calcium sont présents à l'Est (Kebemer et à Louga) et au Sud à Mboro.

Ces variations de teneurs en éléments chimiques peuvent bien s'expliquer par la localisation géographique des stations, l'importance des événements pluviométriques mais également les pollutions anthropiques dans la région.

Tableau 11 : Composition chimique des eaux de pluie (en mg/l) des stations pluviométriques du Littoral Nord en 2011

Stations	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Noto	8,2	8,8	0,5	5,5	5,7	4,1	5,3	4,6	1,2
Mboro	15,0	4,1	0,1	9,2	8,2	0,2	4,9	6,1	1,2
Méouane	2,9	3,4	0,4	2,6	1,4	0,5	2,1	1,8	0,4
Kebemer	6,2	13,1	1,4	3,5	3,7	0,4	3,0	6,6	1,3
Louga	9,6	3,2	0,0	2,5	5,7	1,6	4,2	6,2	1,1
Rao	5,6	4,7	0,3	2,9	3,5	0,3	2,3	4,1	0,8
Sakhal	1,8	1,7	0,2	0,8	1,0	0,1	1,2	1,4	0,3
Potou	6,4	11,2	0,4	3,5	6,0	0,5	2,3	2,8	0,8
Saint-Louis	1,4	1,7	0,3	1,0	0,7	1,1	0,9	0,8	0,2
Moyenne	6,3	5,8	0,4	3,5	4,0	1,0	2,9	3,8	0,8

Ainsi, l'hétérogénéité de la chimie des eaux de pluie peut s'expliquer par la localisation géographique, les dépôts atmosphériques environnants, la fréquence et la quantité d'eau tombée. Cette étude et aussi celles des travaux antérieurs montrent que les eaux les plus chargées se retrouvent généralement en début ou en fin de période pluvieuse (Gaye 1990). Toutefois, il peut y avoir des exceptions en milieu de saison causée par des pollutions spécifiques et ponctuelles comme c'est le cas à Noto, Kebemer et Potou. En effet, les pluies sont faibles en début et en fin de saison et elles sont aussi plus chargées en éléments chimiques contrairement aux périodes de fortes pluviométries principalement en Août et septembre démontrées précédemment où elles sont moins chargées à cause de l'effet dilution. En effet, l'arrivée de la pluie entraîne la dissolution des minéraux et des constituants organiques dans l'air et à la surface du sol. L'air contient donc des particules et des gaz d'origine naturelle (sable, émissions, gaz carbonique) et d'origine humaine (transports, brulis, industries) qui vont se redéposer au sol et s'infiltrer dans le sous-sol pouvant ainsi contaminer la nappe. Les particules se redéposent à même le sol, toutefois les gaz peuvent se transformer en acides par réaction chimique au contact de l'eau dans les gouttelettes nuageuses. La pluie est donc naturellement chargée. Ces inputs peuvent entraîner des réactions chimiques dans la ZNS et les dilutions des éléments chimiques et par conséquent la dégradation de la qualité de la nappe.

VIII.2. Caractérisation physico-chimique (CE, pH, TDS, T, Eh, O₂) de la nappe

Le Tableau 12 résume l'ensemble des paramètres étudiés afin d'apprécier la qualité chimique des eaux de la nappe.

❖ La Conductivité

La Conductivité exprime le degré de minéralisation globale des eaux. Elle est fonction de la concentration en sels dissous, de la nature et des proportions en substances dissoutes. Les conductivités Electriques (CE) varient entre un minimum de 162 $\mu\text{s}/\text{cm}$ en saison humide de 2012 et un maximum de 3590 $\mu\text{s}/\text{cm}$ en saison sèche de 2010 avec des pics de concentration dans les sites de Keur Massar, Mouril, Ndiop Sao et Fass Boye. Ces forts taux peuvent être liés à l'intense activité agricole hormis dans la zone de Keur Massar établie en pleine zone rurale habitée subissant une pollution ponctuelle en saison sèche. Ce paramètre permet ainsi de distinguer les sites affectés par une pollution ou d'infiltration d'eau.

Les valeurs élevées de conductivité sont généralement liées à divers processus tels que le lessivage et/ou la remobilisation des sels accumulés dans les roches, la dissolution des minéraux, l'intrusion saline et les différentes pollutions liées aux activités humaines agricoles, domestiques et industrielles.

❖ Le potentiel redox

Le potentiel redox n'a été mesuré qu'en juin 2011 et Février 2012. Il varie entre -27 mV à Keur Momar Diop (KMD) et 479 mV à Diourmel avec en moyenne 202 mV en fin de saison sèche. En milieu de saison sèche, le Eh fluctue entre -7 et 502 mV respectivement à KMD et Mboro avec en moyenne 259 mV. Ainsi, plus le potentiel d'oxydoréduction est faible, plus le milieu est réducteur à KMD.

❖ Le Carbone Organique Dissous

Les valeurs de Carbone Organique Dissous (COD) sont généralement faibles avec une grande variabilité en fonction des sites et des saisons. Elles varient de 0 mg/l en toute saison à 25,2 mg/l en saison humide avec une moyenne $1,9 \pm 2,5$ mg/l alors que la norme pour les eaux souterraines est de 0,5 à 1 mg/l. Les zones dépressionnaires agricoles sont les sites ayant une charge organique importante ainsi que les stations 1 et 2 en zone rurale habitée particulièrement en saison sèche.

Tableau 12 : Statistique descriptive des paramètres physico-chimiques et des ions mineurs au cours des campagnes en saison sèche (1 et 2) , en mi-saison sèche (3) et en saison humide (4)

Variable	Minimum				Maximum				Moyenne				Ecart-type			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Campagne																
Eh	-	-27	-7	-	-	479	502	-		202,2	267,9	-	-	95,5	123,9	-
O₂ dissous	-	1	0,9	2,4	-	7,1	5,7	9,6	-	4,2	2,9	5,9	-	1,5	1,1	1,6
EC	192	190	184	162	3590	2920	2090	2320	743,1	683,8	639,7	818,4	730,2	609,3	482,3	735,7
ph	4,1	3,9	3,6	4,1	7,7	7,8	7,9	9,9	6,4	6,2	5,9	6,5	0,9	1,1	1	1,3
PE	3,6	2,9	2,9	2,3	37,4	37,5	37,7	37,6	17,9	17,7	17,6	17,8	12,9	12,9	12,8	12,9
COD	0	0	0	0	5,4	13,4	10,9	25,2	0,9	1,8	1,7	3,3	1,4	3,4	2,9	5
Br-	0	0	0	0	27,2	23,4	8,2	13,7	3,2	3,3	1,7	2,8	4,6	4,1	1,6	3,1
Fe²⁺	4,3 10 ⁻³	4,3 10 ⁻³	4,3 10 ⁻³	-	1,6	3,9	0,8	-	0,1	0,2	0,1	-	0,3	0,7	0,2	-
Mn²⁺	1,6 10 ⁻³	1,6 10 ⁻³	1,6 10 ⁻³	-	3,8	2,1	0,9	-	0,3	0,2	0,1	-	0,7	0,5	0,2	-
Al²⁺	2,8 10 ⁻²	2,8 10 ⁻²	2,8 10 ⁻²	-	16,3	1	0,6	-	0,7	0,1	0,1	-	2,9	0,2	0,1	-

❖ Le pH

Les valeurs de pH varient entre un minimum de 3,6 en Février et un maximum de 9,9 en Octobre 2012 (Figure 39) alors que la norme 6,5 - 8,5 (OMS, 2011). Ces pH sont généralement acides avec en moyenne de 6,2. L'analyse spatiale de la variabilité du pH montre une zone Ouest acide, une zone centre neutre et une zone Est basique en saison sèche.

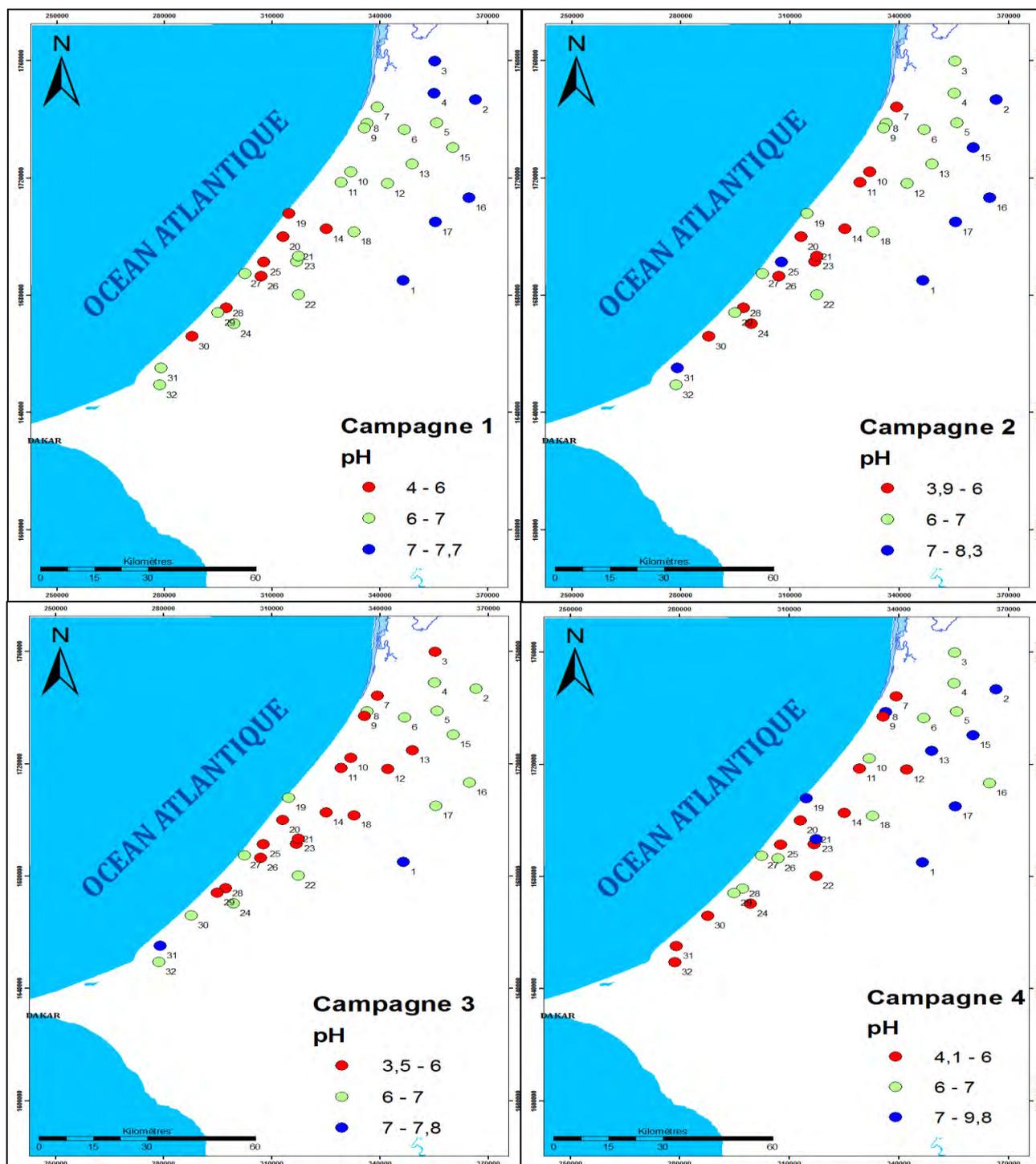


Figure 39 : Distribution spatiale du pH au cours des quatre campagnes

En mi-saison sèche, l'acidité progresse de la partie Ouest vers la partie Centre. Alors qu'en saison humide, les eaux sont basiques dans la partie Nord du secteur d'étude. Les faibles taux de pH pourraient se justifier par les activités agricoles et industrielles, la décomposition de la matière organique présentes dans les Niayes principalement dans les secteurs Sud et Centre.

Aussi, cette acidification des eaux souterraines peut inclure divers facteurs: la remontée du niveau des nappes dans les aquifères pauvres en carbonate, l'oxydation de la pyrite et/ou de la tourbe, la contribution des acides inorganiques, la recharge par des eaux acides, l'oxydation de polluants organiques et inorganiques (Ford *et al.*, 1992).

La nappe du Littoral Nord présente une acidification des eaux due à différentes causes: le caractère superficiel de la nappe des sables quaternaires fait que l'acidité des eaux pourrait s'expliquer par la dissociation de l'acide carbonique issue de la diffusion dans les eaux du CO₂ atmosphérique et des sols, de la décomposition de la matière organique dans le sol qui favorise une acidification de l'eau interstitielle du sol et par conséquent des eaux souterraines. Aussi, la dissociation du bicarbonate (HCO₃⁻) issue de l'infiltration des eaux météoriques dans les eaux souterraines contribuent à cette acidité. Ce phénomène est présent dans les zones dépressionnaires agricoles à faible profondeur de la nappe particulièrement dans la zone Sud. Les faibles pH associés aux faibles niveaux de la nappe se retrouvent dans les zones interdunaires agricoles alors que lorsque ces valeurs sont élevées, elles se localisent au niveau des zones dunaires.

❖ Le TDS (Total Dissolved Salt)

Le TDS (Total Dissolved Salt) est un paramètre qui indique le degré de potabilité ou de pollution des eaux souterraines. En saison sèche de juillet 2010 (campagne 1), les valeurs de TDS varient entre 115 et 2154 mg/l avec en moyenne 446 mg/l. En juin 2011 (campagne 2), le TDS enregistre les valeurs entre 104 et 1700 mg/l avec en moyenne 403 mg/l. En Février 2012 (campagne 3), ces taux fluctuent entre 109 et 1250 mg/l avec en moyenne 380 mg/l. En Octobre 2012 (campagne 4), le TDS varie entre 87 et 1570 mg/l avec en moyenne 437 mg/l (Figure 40). La minéralisation faible des échantillons de la campagne de Février comparé aux autres a été interprété par l'effet de dilution induit par la recharge retardée de l'infiltration des eaux de pluies (Kaba *et al.*, 2016).

La distribution spatiale du TDS ainsi que sa variabilité saisonnière mettent en évidence un secteur centre à Nord et Est présentant des eaux avec teneurs inférieures à 500 mg/l à la

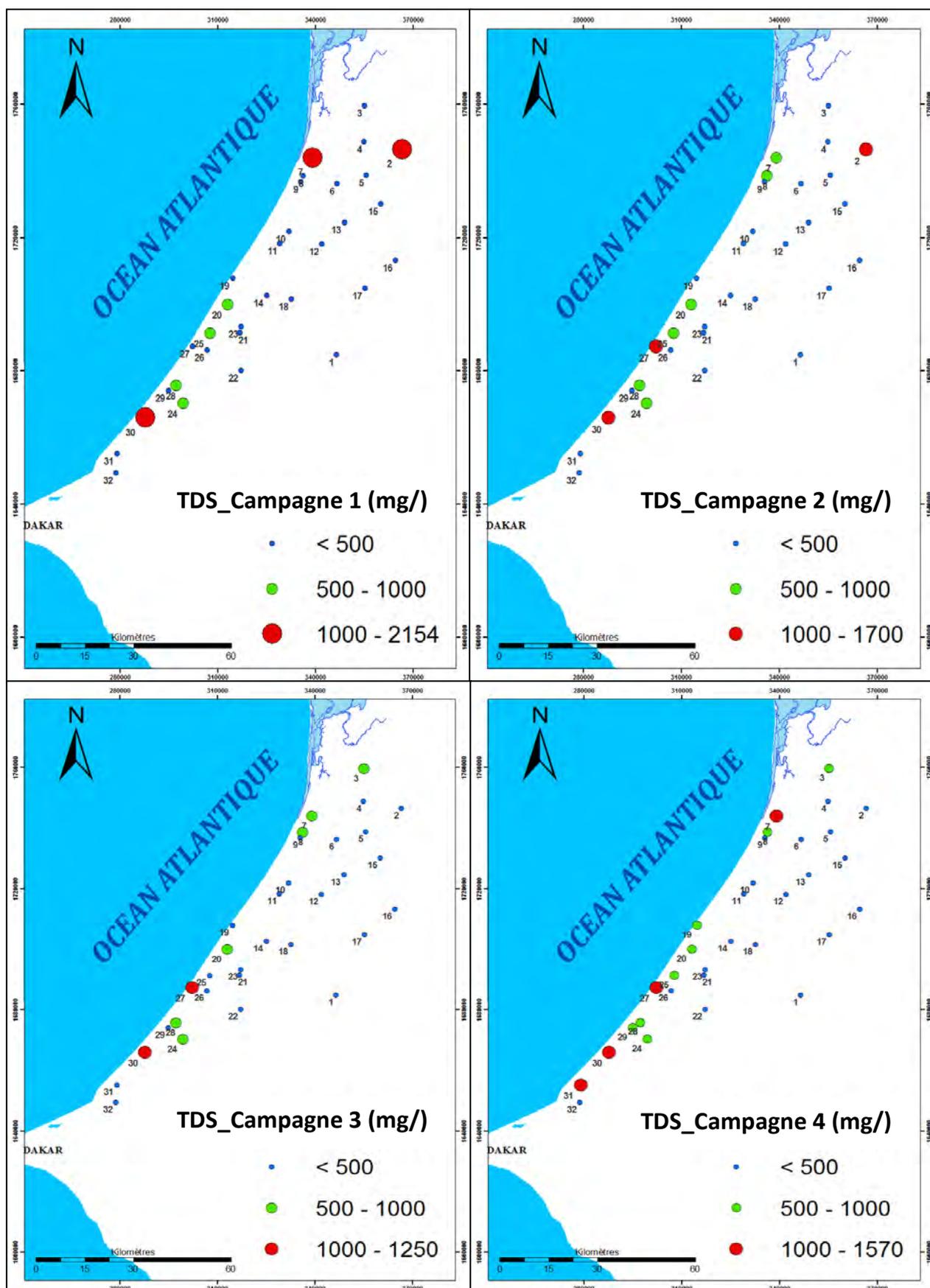


Figure 40 : Répartition Spatiale du TDS au cours des quatre campagnes

norme de potabilité recommandé pour l'AEP (WHO, 2011). Les eaux ayant des TDS compris entre 500 et 1000 mg/l généralement le long du littoral dans le secteur centre à Nord peuvent être permises pour l'AEP.

Dans le secteur Sud à centre et particulièrement dans les Niayes, les eaux avec un TDS entre 1000 et 3000 mg/l sont plus aptes à l'irrigation (Figure 40). Ceci se justifie par la forte activité agricole à l'exception du site de Keur Momar Sarr en saison sèche où la pollution ponctuelle peut être liée à des activités domestiques et pastorales.

Ces valeurs correspondent à des salinités moyennes respectives de 0,4 ; 0,3 et 5,9 ‰ en saison sèche, mi- saison sèche et saison humide. Ceci met donc en évidence une augmentation de la salinité en saison humide due certainement au lessivage des sols et au retour à la nappe des eaux usées et d'irrigation.

La variabilité de l'ensemble des paramètres physico-chimiques de la nappe peut être validée par la carte d'occupation du sol mettant en évidence une zone Ouest fortement anthropisée et un secteur Est principalement occupé par des cultures pluviales (Figure 41). Cette carte peut ainsi aider à identifier les sources de pollution qui sont principalement dans le secteur Sud-Ouest à centre issus des rejets agricoles, industrielles et domestiques avec un retour à la nappe des eaux usées. Le secteur Est est caractérisé majoritairement par l'interaction eau-roche et la dissolution des minéraux alors que le secteur Nord est influencé par l'intrusion marine vu le faible niveau piézométrique de la nappe.

Ainsi, cette analyse montre la variabilité spatiale et temporelle de la fluctuation de la nappe, et celle des paramètres physico-chimiques et de l'hydrochimie de celle-ci.

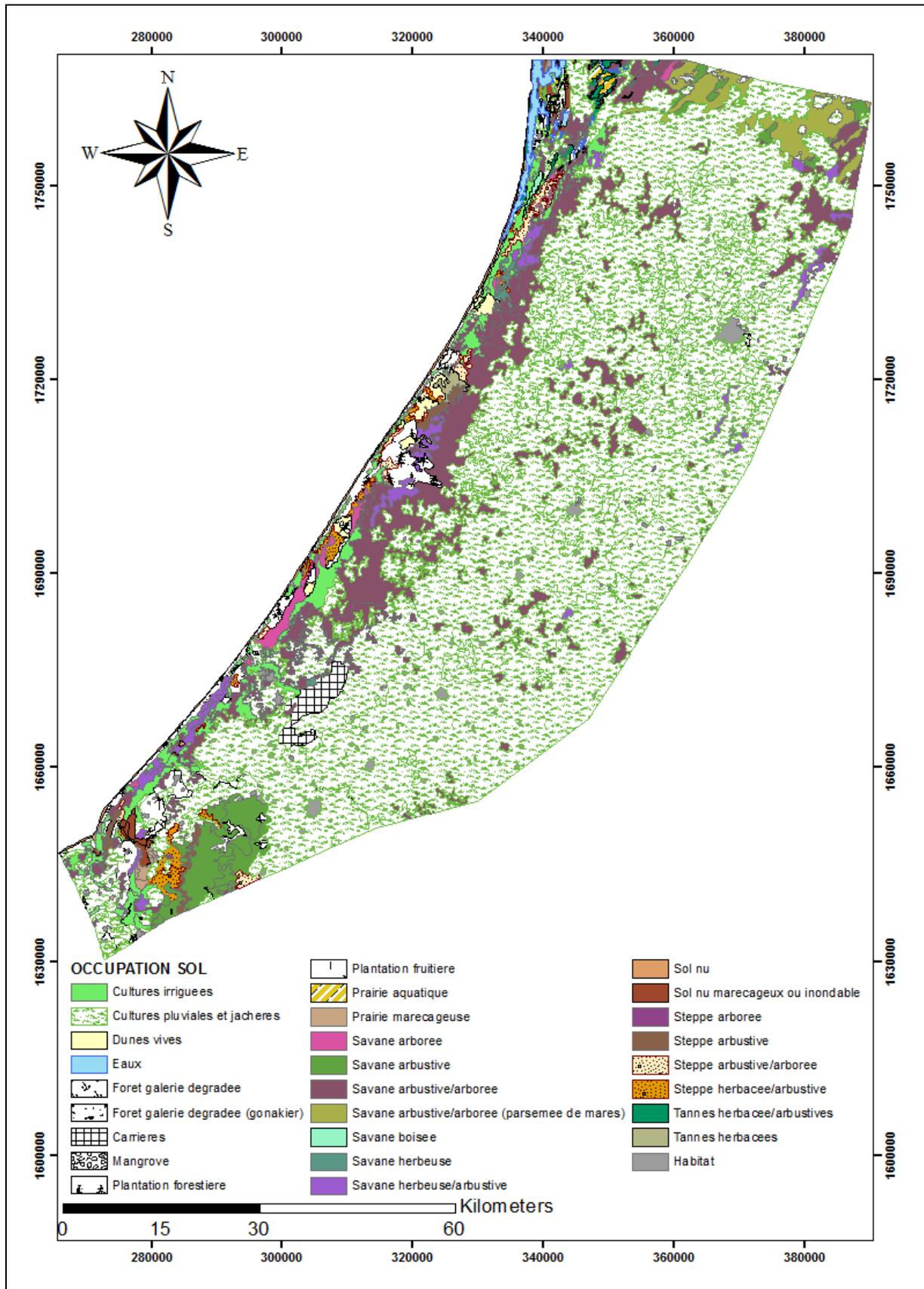


Figure 41 : Carte d'occupation du sol

(source images satellitaire 2008 – google earth 2016)

VIII.3. Hydrochimie des ions majeurs et mineurs de la nappe – statistiques descriptives

VIII.3.1. Ions majeurs

La chimie des eaux souterraines est sujette à des variations aussi bien dans le temps que dans l'espace. Elle peut être influencée par divers facteurs naturelles comme anthropiques qui vont impacter sur sa qualité chimique.

L'évaluation globale de la chimie des eaux souterraines et de ses variations saisonnières ont été réalisées à l'aide des boxplots. Les résultats montrent des teneurs en ions suivant un gradient $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{HCO}_3^-$ pour les deux campagnes sèches successives (juillet 2010, juin 2011) avec une forte dispersion des valeurs, plus importante dans le quartile 3 montrant des concentrations moyennes entre 0 et 5 meq/l pour les ions Cl^- , SO_4^{2+} , Na^+ (Figure 42).

En milieu de saison sèche (Février 2012), un gradient de valeurs moyennes de concentration $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2+} > \text{Ca}^{2+}$ se distingue avec une dispersion notée dans le quartile 3 (Q3). Les teneurs en ions $\text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$ ont fortement diminué par rapport aux campagnes sèches. Nous pouvons donc mettre en évidence l'arrivée des eaux d'infiltration dans la nappe qui diluent les concentrations des éléments chimiques et facilitent la dissolution des carbonates.

En saison humide (Octobre 2012), la même tendance est observée qu'en saison sèche avec des valeurs moyennes de la majorité d'éléments chimiques autour de 5 meq/l à l'exception du SO_4^{2+} où les valeurs sont plus dispersées en Q3. Les valeurs de HCO_3^- sont plus homogènes pour l'ensemble des quartiles avec une moyenne autour de 3 meq/l. Ces valeurs ont été confirmées par la statistique descriptive des paramètres physico-chimiques (Tableau 12) où les valeurs minimales, maximales, moyennes et écart-types ont été calculées au cours des quatre campagnes.

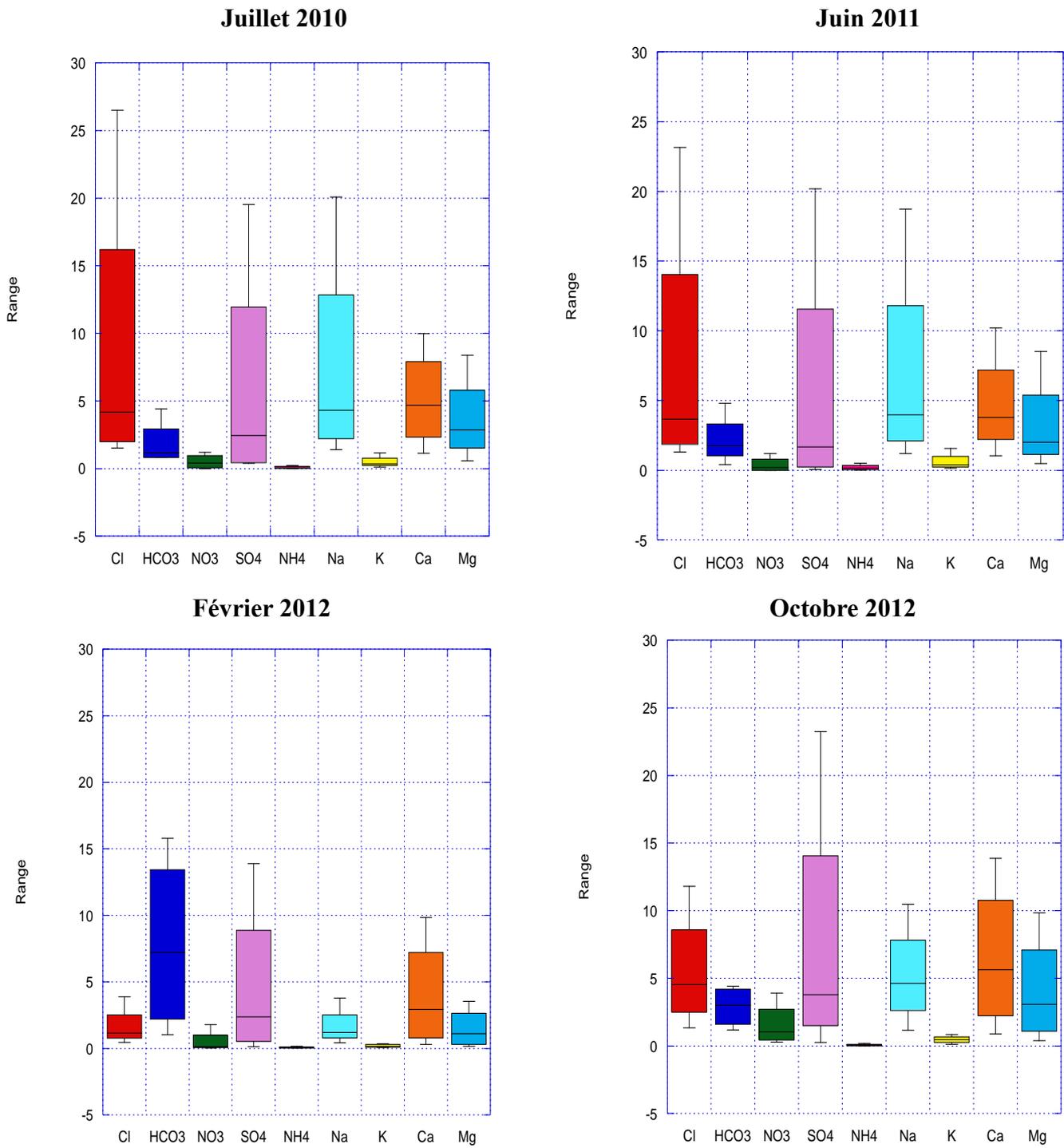


Figure 42 : Composition chimique des eaux souterraines par Boxplots

Ceci met donc en évidence une variabilité importante en fonction de l'espace pour la conductivité électrique qui présente en moyenne $640 \pm 482 \mu\text{s/cm}$ en mi-saison sèche et $818 \pm 736 \mu\text{s/cm}$ en saison humide. Le pH présente par contre une variabilité plus faible en moyenne de $5,9 \pm 1$ et $6,5 \pm 1,3$ respectivement en mi-saison sèche et en saison humide. Cette analyse confirme donc l'hypothèse (E2) cf page 84.

Cependant, cette vision globale témoignera-t-elle des particularités au niveau des sites échantillonnées. Nous tenterons de l'expliquer ultérieurement avec l'analyse géostatistique multivariée développée dans l'article.

VIII.3.2. Eléments mineurs (Fe, Mn, Al)

Les éléments chimiques mineurs sont nécessaires à la caractérisation des eaux souterraines et à la détermination des processus géochimiques qui s'y produisent.

L'analyse des ions Fer, Manganèse et Aluminium réalisés au cours des campagnes de juillet 2010, juin 2011 et Février 2012 ont permis de déterminer la variabilité inter-annuelle de ses éléments chimiques (Figure 43). Celle-ci montre une diminution des teneurs en éléments mineurs au cours des trois années successives qui est plus accentuée pour février 2012 du fait de l'arrivée du flux d'infiltration de l'eau de pluie à la nappe (Kaba et al., 2016).

Les teneurs en Mn sont généralement faibles quantités ($\leq 1,6 \mu\text{g/l}$) qui atteignent $3800 \mu\text{g/l}$ en 2010 à Teureul dans la zone centre du Littoral Nord. Cette teneur maximale est de $2140 \mu\text{g/l}$ en 2011 avant de se limiter à $520 \mu\text{g/l}$ en février 2012. Sachant que la limite OMS fixée à $500 \mu\text{g/l}$, ces eaux souterraines présentent en général des valeurs moyennes admises respectivement 241 ; 120 et $113 \mu\text{g/l}$ au cours des trois campagnes successives.

Les teneurs en Fer présentent des teneurs maximales de $560 \mu\text{g/l}$ en 2010. En 2011, les valeurs augmentent en général et atteignent $3860 \mu\text{g/l}$ puis diminuent à $840 \mu\text{g/l}$ en février 2012. Alors que les valeurs OMS limites sont fixées à $300 \mu\text{g/l}$, les teneurs moyennes en fer sont de 302 , 208 et $69 \mu\text{g/l}$ respectivement pour les trois campagnes.

Les valeurs en Al sont de l'ordre de $16 \mu\text{g/l}$ en 2010 à Teureul et $1 \mu\text{g/l}$ en 2011 avant d'atteindre $620 \mu\text{g/l}$ en 2012. Les valeurs moyennes en Al dans le secteur du Littoral Nord sont de 554 , 8 et $45 \mu\text{g/l}$ avec une norme de potabilité de $200 \mu\text{g/l}$.

Les sources les plus courantes de fer et de manganèse dans les eaux souterraines sont d'une part naturelles avec l'altération du fer et du manganèse provenant de la dissolution des minéraux et des roches; et d'autre part d'origine anthropique avec les effluents industriels, le drainage acide

des exploitations minières et le retour à la nappe des eaux usées principalement dans le secteur Ouest.

Les concentrations en Fer sont en moyenne en dessous de la norme de potabilité de l'OMS (0,3 mg/l) à l'exception des sites dans les parties dépressionnaires agricoles au Sud (Ndiop Sao), au centre (Diourmel) et au Nord (Mouril) en 2011. Un pic de concentration remarquable de Fer a été enregistré dans le forage de Nguer Nguer (10 mg/l) au centre de la zone d'étude. Les fortes teneurs en fer peuvent être liées au faciès lithologique, à la dissolution du complexe argilo-humique particulièrement dans la zone des Niayes.

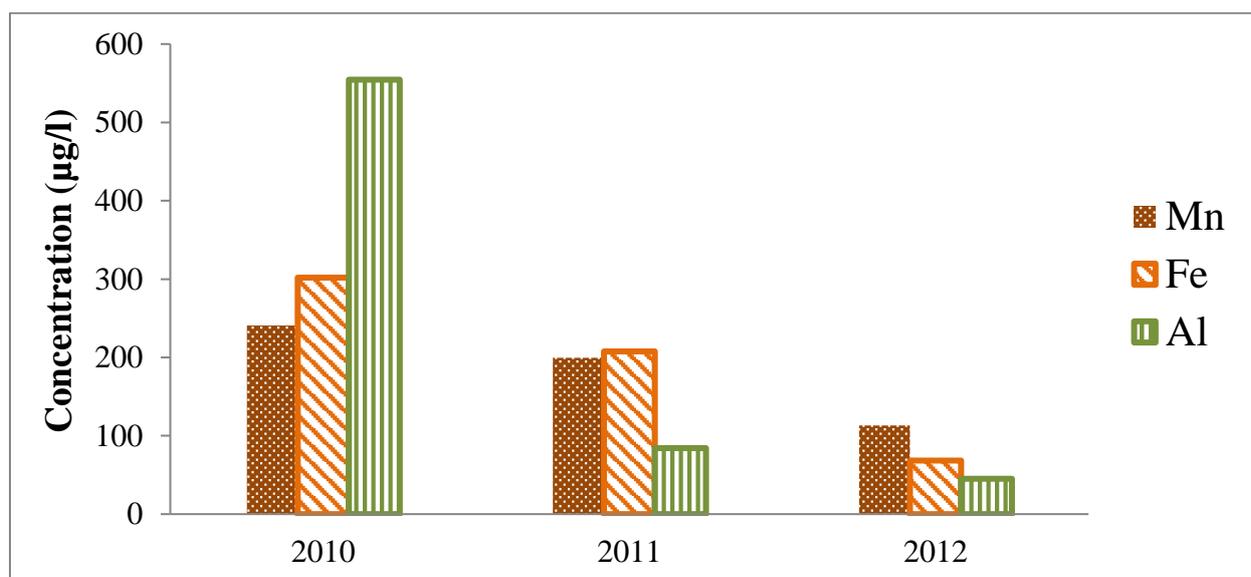


Figure 43 : Concentration chimique moyenne annuelle en Mn, Fe et Al de la nappe du Littoral Nord

Aussi, les oxydes de fer sont des produits d'altération pédogénétique latérisant en climat chaud et humide (Milot, 1964, Duchaufour, 1972). Ces types d'altération sont produits sur les massifs des dunes ogoliennes (Michel, 1973) donnant ainsi naissance à des sols ferrugineux présents dans la zone d'étude. En effet, la dénomination de dunes rouges des massifs ogoliens était due à une oxydation en surface d'une pellicule de fer sur les grains de sable d'où la couleur rouge s'étendant sur deux mètres d'épaisseur (Hebrard, 1958, Adam *et al.*, 1965). Il a été observé de l'eau souterraine rougeâtre au niveau de certains puits (Mboro) au Sud et forage (Ndiamour Fall) au Nord. Ainsi, les doses importantes en fer donnent à l'eau naturelle des propriétés incompatibles avec son utilisation comme AEP, les dépôts ferriques (rouille) ne sont pas tolérables (> 0,3 mg/l) et dépendent de la composition de l'eau, de son oxygénation, de l'ensemble des conditions physico-chimiques.

Comme le Fer, la teneur en Manganèse dans les eaux souterraines est essentiellement contrôlée par les conditions de pH et Eh; sa limite est fixée à 50 µg/l. Dans les eaux pauvres en Oxygène et acides, il est possible de rencontrer des concentrations supérieures à 1 mg/l. Les hydroxydes de fer et autres minéraux argileux constituent également une source de Manganèse. La matière organique peut induire aussi une augmentation de la concentration en Manganèse. Sa dégradation consomme de l'Oxygène et rend le milieu réducteur favorisant ainsi la libération du Manganèse. C'est donc le fond géochimique, ainsi que les conditions d'oxydo-réduction mais également la présence de matières organiques qui sont responsables des teneurs en Fer et en Manganèse des eaux souterraines.

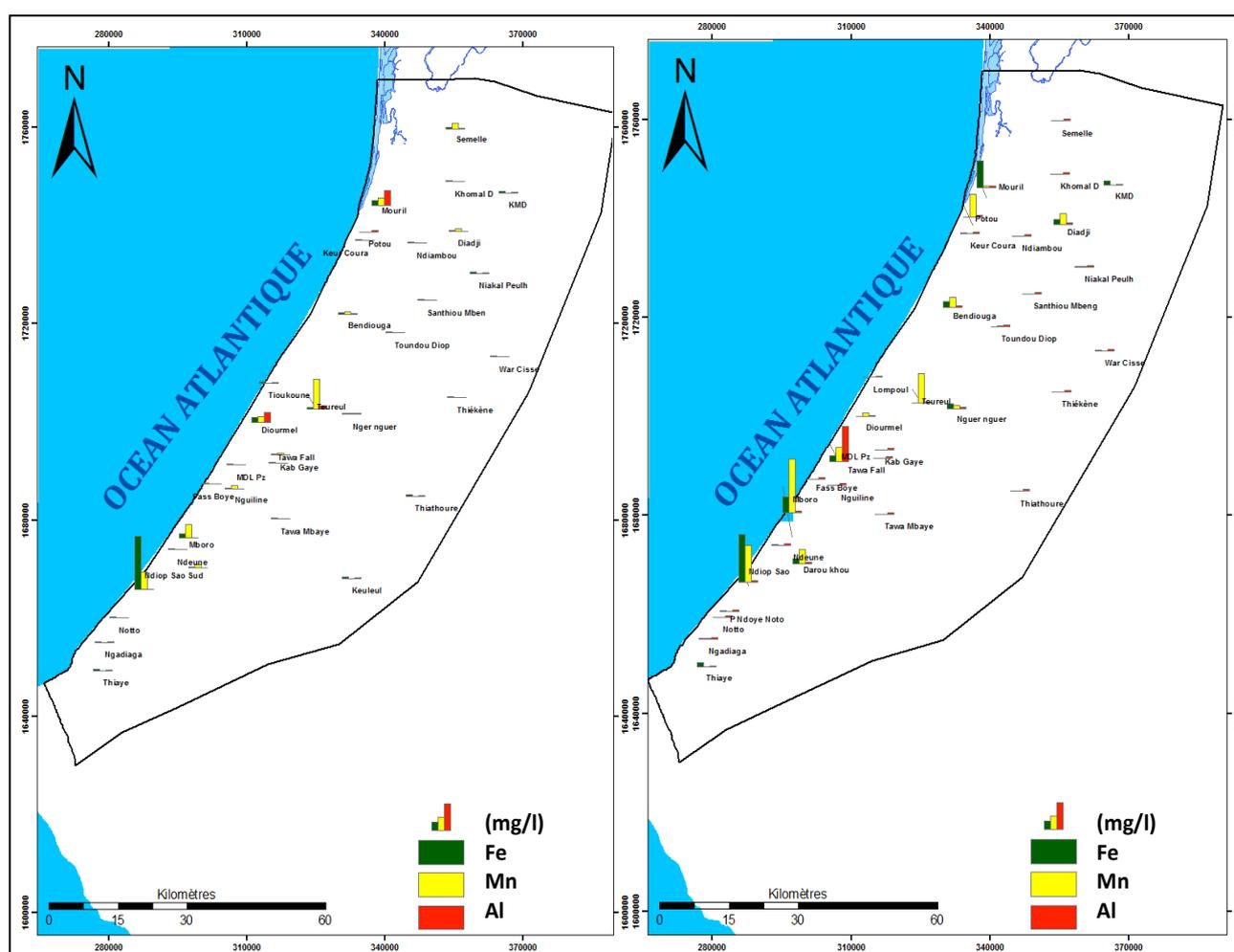


Figure 44 : Distribution spatiales des éléments mineurs (Fe, Mn et Al) en juin 2011 (A) et Février 2012 (B)

Aussi, les fortes quantités d'Aluminium peuvent se corrélérer à de fortes quantités de phosphates. Les différentes études géologiques (Bellion, 1987, Roger *et al.*, 2009) ont montré la présence de phosphates d'alumine dans les secteurs Sud et Centre du secteur du Littoral Nord.

Plus spécifiquement, la variabilité spatiale et temporelle de la chimie des ions mineurs (Fe, Mn, Al) de la nappe met en évidence une zone littorale Ouest principalement la zone des Niayes avec des concentrations importantes et une zone Est avec des teneurs faibles. En effet, les campagnes de juin 2011 et février 2012 (Figure 44) que nous avons choisi présentent les plus grandes variations par rapport à Juillet 2010. Ceci met en évidence une zone Sud riche en Fer vers Ndiop Sao. Du secteur Sud à centre, la nappe renferme des teneurs importantes en Manganèse. Les teneurs en Aluminium sont variables en fonction des années et des sites mais principalement dans le secteur centre du Littoral.

VIII.4. Estimation et processus de salinisation de la nappe

La salinisation représente l'accumulation des sels dans un milieu. Elle affecte autant les eaux souterraines que les sols. Ce phénomène est l'un des plus répandus au niveau des zones arides et côtières. Ces processus dégradent la qualité chimique de l'eau destinée à l'AEP et à l'irrigation mettant en péril l'exploitation de la nappe particulièrement au niveau des aquifères côtiers. Ce problème est accentué par une forte croissance démographique du fait que, 70 % de la population mondiale occupe les zones côtières. Les activités humaines (surexploitation, agriculture intensive, défaut d'assainissement) induisent une salinisation des eaux souterraines (Jones et al., 1999). Pour cette étude, les ions Chlorure, Sodium et Bromure ont été utilisés afin de caractériser la salinité de la nappe du Littoral Nord.

Le Chlorure est un élément conservatif, ne participant pas aux interactions eau-roche et non influencés par les processus redox. Il peut provenir de sources naturelles (intrusion saline, aérosols, embruns marins) ou d'origine anthropique (retour à la nappe des eaux usées et d'irrigation, fertilisants, pesticides, déchets animaux). Toutefois, sa teneur augmente généralement dans le sol sous l'effet de l'évapotranspiration. Il peut donc être utilisé comme traceur pour caractériser l'origine de la salinité (Tellam and Lloyd, 1986, Fidelibus et Giménez et al., 1992).

L'ion Sodium est un élément chimique appartenant à la famille des minéraux alcalins. C'est un cation échangeable dans les eaux et sols par des processus d'échanges de base. Très abondant dans les océans et sur les continents, il forme avec le chlorure des minéraux tel que la halite (NaCl).

L'ion Bromure est un élément mineur conservatif et mobile. Il peut être sélectivement accumulé par l'effet de la présence d'argile vu qu'il est plus large que l'ion Cl⁻ généralement dominant (Hem, 1985). Il peut dériver d'autres sources telles que des bromures de méthyl ou autres

composants organiques bromurés utilisés en agriculture (Vengosh and Pankratov, 1998) ou de la décomposition de la MO du sol (Gerriste & George, 1998). Le Bromure, comme le chlorure peuvent avoir une origine commune. C'est aussi un excellent indicateur pour évaluer l'influence marine et l'effet de l'évaporation.

L'analyse du graphique Na vs Cl (Figure 45-A) montre que ces deux éléments chimiques présentent une bonne corrélation proche de 1:1 pour l'ensemble stations et des campagnes réalisées. Ceci indique que les ions ont la même origine qui peut être soit par les processus géochimiques naturels de dissolution de l'halite ou de réactions d'échange de base soit par la contamination de l'eau de mer. Ce processus est à l'origine du type de faciès Na-Cl dans les eaux douces comme les eaux salées (Obiefuna & al., 2011, Appelo & Postma, 2005).

Le diagramme binaire Na/Cl vs Cl (Figure 45-B) confirme bien une acquisition des ions Na⁺ par différents processus géochimiques autre que la contamination marine pour les eaux douces. Les ratios élevés de Na/Cl des eaux douces traduisent un apport supplémentaire de Na par rapport à Cl (considéré ici comme conservatif) – cet apport pourrait provenir soit de l'hydrolyse des silicates, de la dissolution de l'halite ou des échanges de base à la surface des minéraux argileux. Mais c'est cette dernière qui semble être plus prominente du fait de la constitution minéralogique de l'aquifère (Chemseddine et al., 2009, Postma et al., 2005). Dans les eaux salées localisées sur la frange cotière, l'intrusion saline semble être la principale cause si l'on se réfère au ratio ionique Na/Cl proche de 0.86.

Le rapport Br/Cl comparé à celui de l'eau de mer est utilisé comme traceur pour différencier l'origine marine (Andreasen & Fleck 1997, Marjoua, Olive et al., 1997, Faye et al., 2005), et permet d'identifier d'autres sources de contamination des eaux souterraines (Vengosh et Pankratov, 1998).

Le rapport Br/Cl de l'eau de mer actuel est relativement constant ($3,7 \cdot 10^{-3}$) dû au temps de séjour extrêmement long de ces ions dans les océans et la dissolution de l'Halite qui habituellement caractérisée par un faible ratio $0,183 \cdot 10^{-3}$ (Marjoua et al., 1997). Dans cette étude, nous avons utilisé le ratio molaire (Br/Cl*1000). Le rapport Br/Cl de l'océan est relativement homogène et peut varier faiblement en fonction des techniques analytiques et des effets locaux (Alcala & Custido 2008, Wittemore 1988). Ce ratio peut être utilisé pour identifier les divers flux salins et leur relative contribution, afin de discriminer les phénomènes naturels de ceux qui sont anthropiques causés par la salinisation puisque Br⁻ et Cl⁻ sont considérés comme des ions conservatifs (Faye et al., 2005, Hsissou, 1998, Andreasen & Fleck 1997).

L'analyse du diagramme binaire Br vs Cl (Figure 46-A) montre que les eaux souterraines du Littoral Nord sont généralement proches de la droite de mélange principalement en saison sèche. Une différenciation des caractéristiques est notée en fonction des saisons avec des eaux plus riches en Br⁻ en Février 2012 (campagne 3), et des eaux plus riches en Cl⁻ en campagnes 1, 2 et 4. Ceci est certainement lié à l'importance de l'évaporation en saison sèche et du lessivage des sols après la saison des pluies associé à la dissolution des minéraux.

La variabilité saisonnière de la composition chimique des eaux souterraines par l'analyse du ratio Br/Cl (Figure 46-B) met en évidence des teneurs généralement inférieures à celui de l'eau de mer pour les trois campagnes à l'exception de trois sites en mi-saison sèche. En effet, les eaux souterraines présentent à Thiaye un ratio Br/Cl ayant la même signature que l'eau de mer ($3,7 \cdot 10^{-3}$). Ces teneurs sont largement supérieures à Mboro ($5,10 \cdot 10^{-3}$) et Teureul ($5,02 \cdot 10^{-3}$). Le site de Thiaye proche de la côte et du Lac Tanma présente donc des eaux souterraines influencés par la présence de la mer. Les sites de Mboro et Teureul sont soumis à une diversité des sources d'apports en Br⁻ et Cl⁻ dans l'aquifère différent de l'intrusion marine telles que l'activité anthropique intensive. Les travaux de Davis (1988) montrent que les ratios Cl/Br compris entre 300 et 600 correspondant des ratios Br/Cl entre $3 \cdot 10^{-3}$ et $6 \cdot 10^{-3}$ présentent une nappe contaminée par des eaux usées et la dissolution de la halite pour un ratio entre $1 \cdot 10^{-3}$ à $10 \cdot 10^{-3}$. Il peut aussi avoir d'autres processus d'acquisition de la minéralisation tels que les précipitations locales, le ruissellement, le lessivage des sols et la dissolution des minéraux.

Ainsi, la salinisation par l'eau de mer ne se manifeste pas dans la zone proche du dôme piézométrique sur l'axe Thiès-Louga qui présente un écoulement divergent et repousse les eaux salées vers la mer et les depressions. Cependant, l'influence marine est notée dans la zone Sud proche du Lac Tanma et la zone Nord principalement en milieu de saison sèche où la recharge de la nappe est maximale au niveau des sites tel que Thiaye, Mboro et Teureul. De plus, la diminution de la teneur en Bromure pour la majorité des sites témoigne d'un phénomène de dilution avec des arrivées d'eau dans la nappe en milieu de saison sèche.

Le phénomène de dissolution de l'halite dans l'aquifère a été observée au niveau des sites de Thiathour en campagne 1, 2 et 3 ainsi que les sites de Keur Coura, Bendiouga, Teureul et Ndiop Sao de la campagne 4. Ce processus intervient dans l'acquisition de la minéralisation des eaux à l'échelle locale mais à l'échelle régionale, il présente une faible ampleur.

L'origine de la salinité des eaux souterraines peut être marine avec l'apport des précipitations qui est une source naturelle de bromure. Les valeurs sont voisines et supérieures de celle de l'eau de mer ($3,7 \cdot 10^{-3}$) peuvent témoigner d'une source d'intrusion saline.

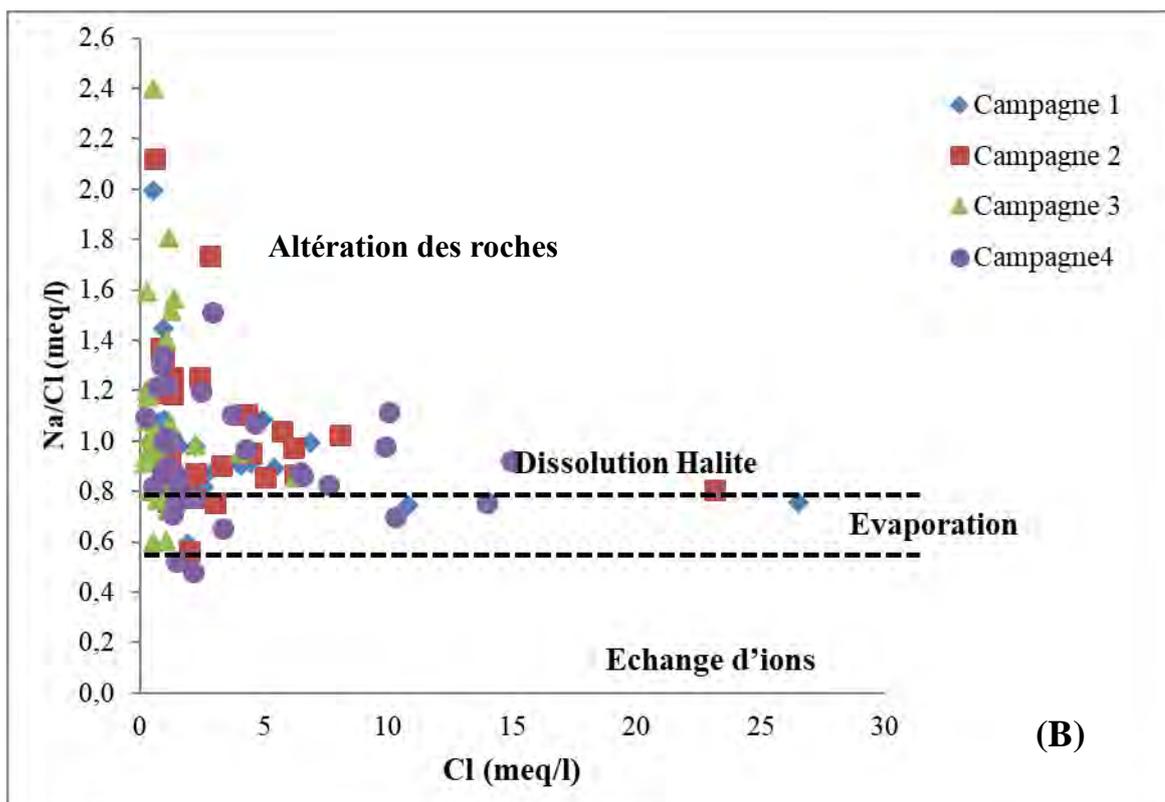
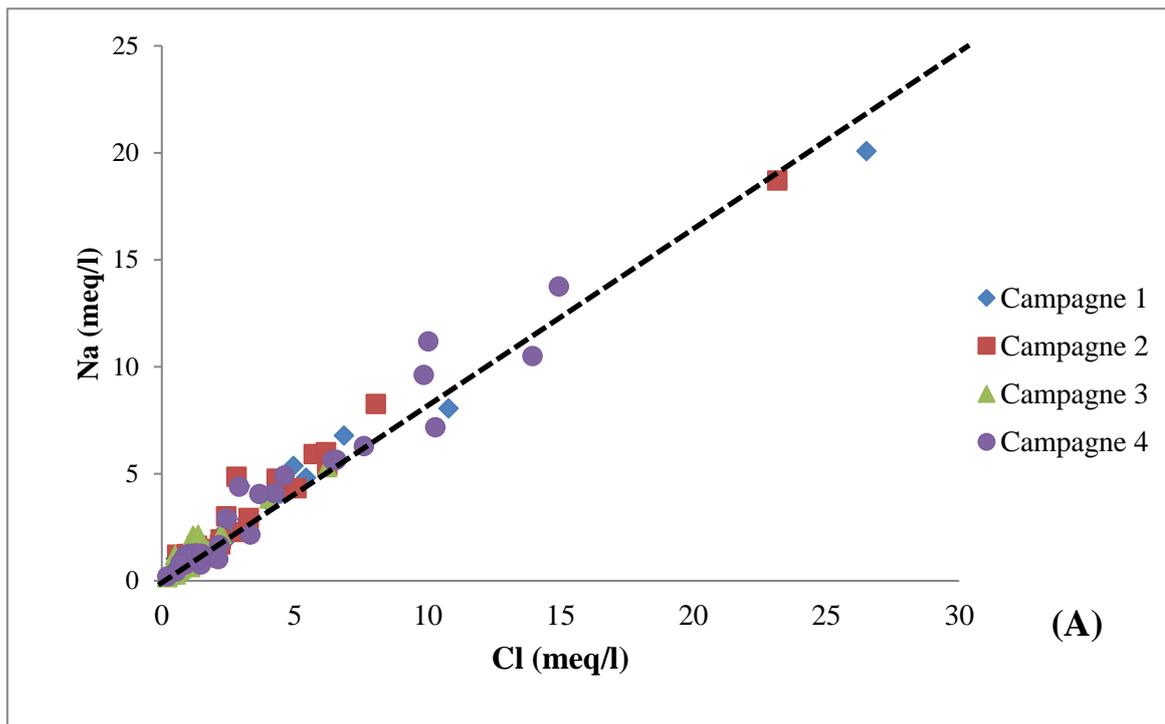


Figure 45 : Diagramme Na vs Cl (A) et Na/Cl vs Cl (B)

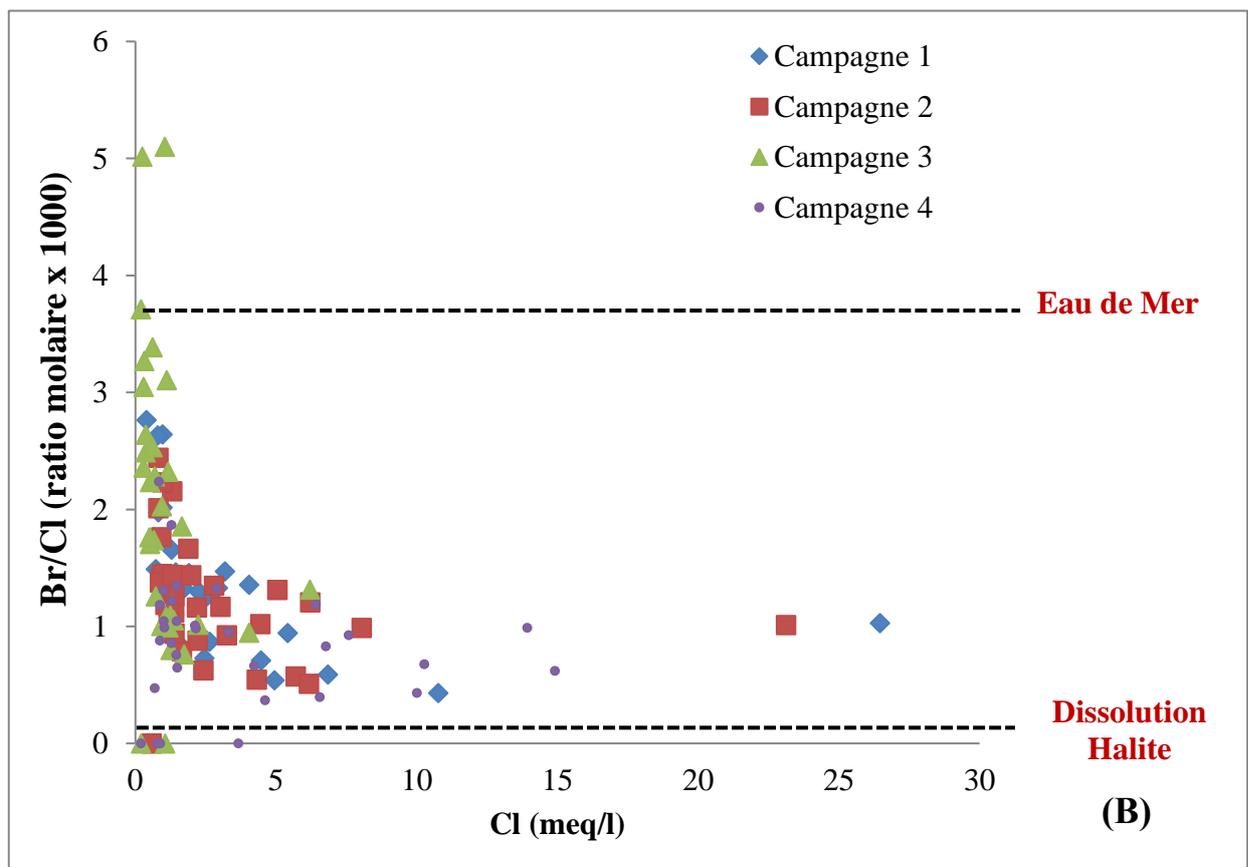
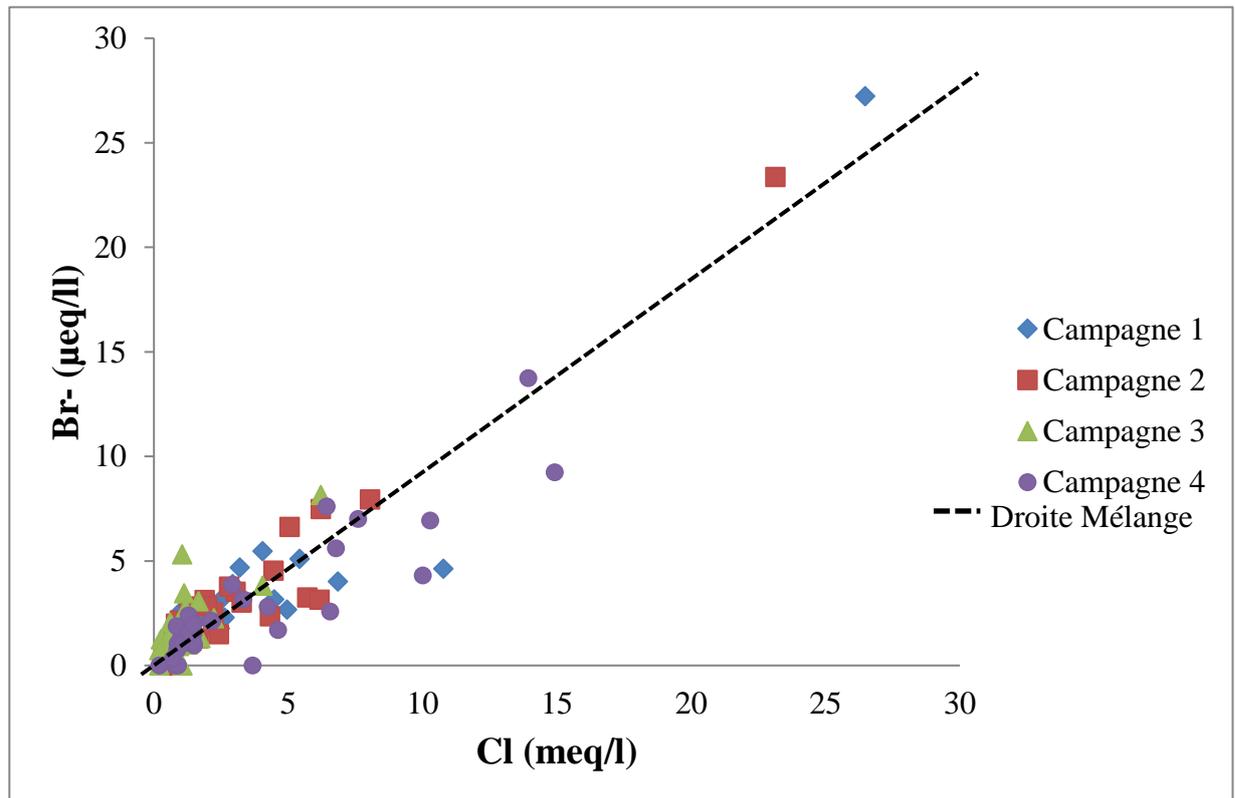


Figure 46 : Diagramme Br vsCl (A) et Br/Cl vs Cl (B)

L'augmentation du rapport Br/Cl peut être due aux aérosols et embruns marins (Duce & Hoffman, 1976). Elle peut aussi être issue des eaux d'infiltration à travers les horizons organiques du sol qui stockent l'ion Br⁻ (Gerritse & George, 1988). Elle peut être par ailleurs d'origine climatique avec la forte reprise évaporatoire en zone semi-aride.

L'ion Br⁻, du fait de sa parfaite corrélation avec la droite de mélange peut permettre le calcul des fractions d'eau de mer qui peuvent contaminer la nappe. Le bilan de masse à partir de l'ion Bromure entre deux pôles de mélange dont le pôle « eau de mer » et le pôle « eau douce » en zone côtière a permis de déterminer la fraction saline, les concentrations de mélange d'eau et le delta ionique du Bromure sur les 32 sites au cours des quatre campagnes.

L'ensemble des résultats est présenté dans le Tableau 13. Ainsi, la fraction d'intrusion d'eau de mer contribuant à la salinisation de cet aquifère varient en juillet 2010 entre 0,1 et 3,2 % avec en moyenne 0,3 %. En juin 2011, elle fluctue entre 0,1 et 2,7 avec en moyenne 0,4 %. Elle varie entre 0 à 0,9 % et de 0,1 à 1,6 % avec des moyennes respectives de 0,2 et 0,3 % en Février et Octobre 2012. La marge d'erreur est principalement liée à la précision des mesures de concentrations chimiques est 5 %.

Toutefois, les sites de Thiathour (en saison sèche), Kab Gaye (en période mi-saison sèche) ainsi que Keur Coura, Bendiouga, Teureul et Ndiop Sao (en saison humide) ne présentent pas de contribution marine dans la salinisation des eaux.

Le site Keur Momar Diop (KMD) présente les valeurs les plus élevées en saison sèche, ceci confirme que l'intrusion marine se manifeste plutôt dans la zone Nord particulièrement du fait de la charge hydraulique proche du O IGN (en même négatif au niveau de certaines zones) et le gradient hydraulique qui sont très faibles. La remontée de la nappe qui s'amorce à partir des années 2010 aurait pour conséquence de repousser le biseau salé vers la côte.

Néanmoins, cette intrusion est en général faible à l'échelle globale de la zone d'étude. Ce résultat est en concordance avec la morphologie de la piézométrie qui met en évidence un dôme dans la zone Sud allongé jusqu'à la partie centre avec un écoulement divergent et un fort gradient qui a tendance à repousser l'eau de mer de l'eau douce. Ce phénomène de salinisation est plus prononcé dans la partie Centre-Ouest du Sénégal au niveau du Delta Saloum avec une intrusion saline de 1 à 7 % (Faye et al., 2005).

L'hypothèse de l'intrusion marine comme source de salinité est donc un facteur impactant faiblement sur la chimie des eaux. Cependant d'autres processus tels que l'évaporation, l'échange des ions, la dissolution des minéraux, l'hydrolyse des minéraux argileux contribuent fortement aux processus de minéralisation de la nappe du Littoral nord.

Tableau 13 : Valeurs calculées de la fraction saline (Fs), des concentrations de mélange (Mi,mix) et du delta ionique du bromure (Δ Br) dans les eaux souterraines du Littoral Nord au cours des quatre campagnes 1, 2, 3 et 4

Num	ID	Fs 1	Fs 2	Fs 3	Fs 4	Mi mix1	Mi mix2	Mi mix3	Mi mix4	Δ m Br 1	Δ m Br 2	Δ m Br 3	Δ m Br 4
1	Thiat	-0,04	-0,04	-0,04	0,14	-0,90	-0,90	-0,90	26,17	-0,90	-0,90	-0,90	26,05
2	KMD	3,20	2,74	0,37	0,24	59,42	51,74	7,54	33,32	57,25	49,87	7,26	33,13
3	SemP	0,61	0,85	0,28	0,86	12,36	17,09	5,72	207,84	11,92	16,50	5,51	207,23
4	KhomD	0,11	0,11	0,09	0,09	2,28	2,22	1,91	21,60	2,17	2,11	1,82	21,51
5	Diadj	0,11	0,11	0,09	0,05	2,25	2,31	1,94	15,95	2,14	2,20	1,85	15,89
6	NdFall	0,34	0,33	0,18	0,33	6,97	6,75	3,78	39,45	6,71	6,50	3,62	39,20
7	Mour	0,51	0,50	0,32	1,59	10,36	10,12	6,60	-48,96	9,99	9,76	6,36	-50,06
8	Potou	0,51	0,75	0,93	0,79	10,48	15,07	18,67	135,82	10,11	14,54	18,01	135,26
9	Kcoura	0,26	0,29	0,08	-0,04	5,33	6,03	1,60	0,00	5,13	5,80	1,52	0,00
10	Bendio	0,11	0,11	0,07	-0,04	2,34	2,31	1,57	0,00	2,23	2,20	1,49	0,00
11	Petio	0,23	0,26	0,20	0,21	4,69	5,33	4,14	31,07	4,51	5,13	3,98	30,90
12	Tound	0,16	0,14	0,14	0,07	3,41	2,89	2,98	19,65	3,27	2,77	2,86	19,57
13	SMBeng	0,14	0,11	0,06	0,08	2,83	2,31	1,29	20,93	2,71	2,20	1,22	20,85
14	Teure	0,20	0,19	0,10	-0,04	4,23	4,02	2,19	0,00	4,07	3,86	2,09	0,00
15	NiaPe	0,20	0,12	0,07	0,11	4,23	2,49	1,54	24,08	4,07	2,38	1,46	23,97
16	WarC	0,29	0,29	0,06	0,21	5,91	6,06	1,26	31,17	5,68	5,83	1,19	31,00
17	Thiek	0,18	0,16	0,06	0,09	3,68	3,41	1,36	21,60	3,54	3,27	1,28	21,51
18	Nguer	0,08	0,10	0,04	0,08	1,76	2,06	0,77	20,76	1,67	1,97	0,72	20,68
19	Lomp	0,15	0,38	0,10	0,62	3,17	7,72	2,00	74,32	3,03	7,44	1,91	73,87
20	Diourm	0,27	0,24	0,12	0,16	5,63	4,87	2,43	27,61	5,42	4,69	2,32	27,48
21	TawaF	0,15	0,15	0,06	0,08	3,04	3,17	1,26	20,58	2,91	3,03	1,19	20,50
22	TawaM	0,21	0,18	0,06	0,18	4,33	3,72	1,26	29,18	4,16	3,57	1,19	29,03
23	KbaG	0,09	0,15	-0,04	-0,01	1,82	3,07	-0,90	-4,58	1,73	2,94	-0,90	-4,60
24	Darou	0,42	0,40	0,13	0,41	8,59	8,29	2,64	46,06	8,28	7,99	2,53	45,76
25	MDL	0,33	0,34	0,14	0,29	6,84	7,06	2,92	36,50	6,59	6,80	2,80	36,28
26	Ngui	0,13	0,11	0,07	0,14	2,61	2,40	1,39	26,51	2,50	2,29	1,31	26,39
27	Fass	0,56	0,90	0,41	1,06	11,49	18,14	8,41	-502,17	11,09	17,51	8,11	-502,91
28	Mbor	0,43	0,33	0,59	0,47	8,89	6,78	12,00	51,45	8,57	6,53	11,57	51,10
29	Ndeu	0,23	0,19	0,11	0,26	4,72	3,87	2,34	34,69	4,54	3,71	2,23	34,49
30	NdSao	0,17	0,13	0,09	-0,04	3,47	2,80	1,97	0,00	3,33	2,68	1,88	0,00
31	Ngadia	0,30	0,31	0,23	0,78	6,24	6,45	4,66	130,15	6,01	6,21	4,48	129,59
32	Thiaye	0,19	0,21	0,04	0,19	3,90	4,39	0,92	29,98	3,74	4,21	0,87	29,82
	Moyenne	0,34	0,35	0,16	0,29	6,76	7,00	3,35	18,77	6,50	6,74	3,21	18,55

Aussi, en saison sèche les concentrations de mélange (Mi, mix) sont de 59 et 52 mg/l au site de KMD respectivement en 2010 et 2011. Elles sont maximales au site Semel situé plus au Nord atteignant des valeurs de 207,8 mg/l en saison humide. Ceci se confirme l'intrusion marine au

Nord de la zone d'étude qui a été prédit par le modèle de Faye, 1995 à l'horizon 2025. Il a été aussi noté des concentrations de mélanges supérieures à 130 mg/l dans les sites de Potou et Ngadiaga proches de la côte. Cependant, il n'y a pas de mélange pour les sites de Fass Boye, Ndiop Sao et Mouril situés aussi proche de la côte. Ceci démontre l'implication d'autres facteurs plus importants en saison humide au niveau de ces sites comme l'évaporation et la dissolution des minéraux contribuant à augmenter la minéralisation de la nappe mais aussi des sols. Bien qu'il ait été établi avec la piézométrie de 1999, une avancée du biseau salé de 2 Km en 15 ans soit de 0,13 km/an (Pernel & Gageonnet, 1992), les réactions d'échanges de base entre les ions Na et Ca dans les eaux souterraines généralement à faciès Na-Cl en fin de saison sèche et en saison humide résulteraient du fait que Na remplace graduellement Ca à la surface des minéraux argileux à dominante kaolinitique (Faye, 2005).

Par ailleurs, un faible enrichissement de l'ion Br⁻ sur l'ensemble des sites à l'exception du site de Thiathour en saison sèche avec en moyenne 6,5 ; 6,7 et 3,2 mg/l pour les campagnes respectives 1, 2 et 3. Toutefois, en saison humide, l'enrichissement est plus important pour l'ensembles des ouvrages. En effet, elles montrent un fort enrichissement des eaux souterraines en bromure à Semel et Potou (au Nord), Ngadiaga (au Sud proche du Lac Tanma) avec respectivement des valeurs de 207, 136 et 130 mg/l. Un appauvrissement en bromure est enregistré à Fass Boye, Mouril et Kab Gaye avec respectivement 503, 49 et 5 mg/l. A l'échelle régionale, la nappe du Littoral Nord présente un gain moyen en bromure de 19, 7 et 3 mg/l respectivement en saison humide, début et milieu de saison sèche. Ceci justifie l'hétérogénéité de la répartition spatiale et temporelle des processus géochimiques mis en œuvre en fonction de la localisation géographique et des sources de minéralisation plus diversifiés en saison humide qu'en saison sèche avec l'effet dilution. Ceci corrobore donc avec les travaux de Kouzana et *al.*, 2007, Petelas et Diamantis, 1999 qui ont montré que le phénomène de salinisation par les eaux marines est souvent accompagné d'autres processus qui modifient les caractéristiques du mélange d'eau. Ainsi, les carbonates et les argiles participent à la dissolution et à la précipitation de certains minéraux; et à l'échange cationique de base qui agit en opposition aux changements de minéralisation provoqués par l'intrusion marine.

Conclusion du Chapitre VIII

Les eaux souterraines présentent une variabilité spatiale et temporelle des caractéristiques physico-chimiques et hydrochimiques de la nappe. En effet, les conductivités électriques varient entre un minimum de 162 $\mu\text{s/cm}$ en saison humide de 2012 et un maximum de 3590 $\mu\text{s/cm}$ en saison sèche de 2010 dans le secteur enregistrant un pH minimum de 3,6 dans le secteur Sud-Ouest en mi-saison sèche et un pH de 9,9 dans le secteur Nord de la zone d'étude. De plus, le COD varie entre de 0 mg/l en toute saison à 25,2 mg/l en saison humide notifiant d'une charge organique dissoute considérable. Aussi, les salinités moyennes de 0,4 ; 0,3 et 5,9 ‰ respectivement en saison sèche, mi-saison sèche et saison humide mettent en évidence une acquisition de la minéralisation des eaux souterraines en saison humide par lessivage des sols et au retour à la nappe des eaux usées et d'irrigation.

Les eaux de pluie, valeur d'entrée dans le système aquifère, sont faiblement minéralisées suivant un gradient de concentration $\text{Cl} > \text{NO}_3 > \text{Na} > \text{Ca} > \text{SO}_4 > \text{K} > \text{NH}_4 > \text{Mg} > \text{PO}_4$ alors que la chimie globale des eaux souterraines plus minéralisées avec un gradient $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{HCO}_3^-$ en saison sèche et en saison humide. Toutefois, en mi-saison sèche ce gradient est changé $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$ avec la dominance nette des ions HCO_3^- . Ceci confirme à cette période de Février, l'arrivée des eaux d'infiltration dans la nappe contribuant aux processus de dissolution des minéraux et du CO_2 des sols ainsi qu'à la dilution de la concentration des éléments chimiques.

Par ailleurs, la distribution des ions mineurs (Fe, Mn, Al) dans la nappe montre un secteur Ouest principalement la zone des Niayes avec des concentrations importantes et un secteur Est avec des teneurs faibles. Elle présente en moyenne des concentrations de 241, 120 et 113 $\mu\text{g/l}$; 302, 208 et 69 $\mu\text{g/l}$; et 554, 8 et 45 $\mu\text{g/l}$ de respectivement en Mn, Fe et Al respectivement en Juin 2011, Février et Octobre 2012. Un faible enrichissement de l'ion Br^- est noté avec en moyenne de 6,6 et 3,2 mg/l pour les campagnes en fin et mi-saison sèche et un fort enrichissement en saison humide de 18,6 mg/l à l'exception du site de Thiathour situé à l'Est du secteur.

Aussi, la fraction d'intrusion marine contribuant à la salinisation de cette nappe varie en moyenne de 0,4, 0,2 et 0,3 % respectivement en saison sèche, mi-saison et saison humide avec un maximum de 3,2 % en saison sèche. Cette intrusion saline se manifeste principalement au Nord du secteur au niveau des sites de Keur Momar Diop et Semel. Cependant, la salinisation n'est pas le facteur dominant dans les secteurs Sud et Centre du Littoral Nord. Ce résultat est en concordance avec la morphologie de la piézométrie qui montre un dôme dans la zone Sud

allongé jusqu'à la latitude de Louga avec un écoulement divergent et un fort gradient qui a tendance à repousser l'eau de mer de l'eau douce. De plus, les concentrations de mélange eaux souterraines – eau de nappe sont plus importantes en saison humide par rapport à la saison sèche. Elles montrent un fort enrichissement des eaux souterraines au Nord (Semel, Potou) et au Sud à proximité du lac Tanma (Ngadiaga) du secteur d'étude.

Ainsi, l'acquisition de la minéralisation s'effectue donc hormis l'intrusion marine par d'autres processus géochimiques que sont les échanges de base, l'évaporation, la pression partielle du CO₂ de l'air et des sols, la dissolution des minéraux évaporitiques, l'hydrolyse des minéraux argileux, l'altération des roches. Toutefois, les apports anthropiques sont dominants par rapport aux apports naturels principalement en saison sèche. En saison de pluie les processus naturels tels que le lessivage des sols, la dissolution des roches et minéraux, l'hydrolyse des minéraux argileux, la dissolution du CO₂ de l'air et des sols sont assez importants. L'évaporation est quasi présente et importante en toute saison ainsi que la dégradation de la matière organique. Ces processus peuvent contribuer individuellement ou de manière simultanée à la minéralisation de la nappe.

Chapitre IX : Origine de la Minéralisation et Processus Géochimiques dans la nappe du Littoral Nord

IX.1. Etude la variabilité spatiale et saisonnière de l'hydrochimie de la nappe du Littoral Nord par Approche Géostatistique

Ce sous-chapitre présente les résultats de l'article scientifique Kaba et *al.*, 2016 publié dans le journal *Environnemental Earth Sciences* (Annexe 5).

La nappe du Littoral Nord est soumise à une demande en eau grandissante pour l'AEP des populations locales le long du littoral et celle de la capitale. Cette nappe contribue pour 100 à 130.000 m³/j à l'AEP des villes environnantes et celle de Dakar (IDEV-ic, 2011). Elle alimente aussi considérablement la zone agricole des Niayes et les industries d'exploitation minière le long de la côte. Ces dernières sont principalement les Industries Chimiques du Sénégal (ICS) pour les gisements de phosphates et du projet « Grande Côte Operations » (GCO) pour les gisements de métaux lourds (zircon, Titane, Ilménite). Ces gisements noyés dans la nappe sont localisés au Sud de la zone de dôme piézométrique pour le phosphate et le long de l'alignement des dunes littorales sur plus de 100 km pour les métaux lourds.

Cette étude vise donc à une réévaluation qualitative de la ressource au regard des nouvelles contraintes environnementales et de développement socio-économique dans la région en testant surtout la performance des outils statistiques permettant d'identifier les familles chimiques d'eaux souterraines et les processus géochimiques mis en jeu. Ce travail consiste à coupler les techniques conventionnelles et une approche géostatistique par Classification Hiérarchique (CH) par méthode Dendogramme et Analyse en Composantes Principales (ACP) sur trente-deux stations d'échantillonnage au cours de quatre campagnes dont deux en saison sèche, une mi-saison sèche et une à la fin de la saison des pluies avec neuf paramètres analysés (Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, Na⁺, Ca²⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺). Ces outils vont ainsi permettre de définir des familles chimiques, d'étudier leur variabilité, de caractériser les processus géochimiques et isotopiques, de mieux comprendre les origines et de déterminer les sources de pollution.

IX.1.1. Variabilité saisonnière de la qualité des eaux souterraines

L'évaluation des caractéristiques physico-chimiques et chimiques réalisée à partir d'une approche statistique descriptive montre des valeurs moyennes dans le même ordre de grandeur pour les campagnes en fin saison sèche Juin (1 et 2) et en saison humide Octobre (4). Cependant, la campagne en mi-saison sèche Février (3) présente des valeurs généralement plus faibles. Les

concentrations chimiques montrent les tendances d'abondance dans l'ordre de $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ pour les cations et $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$ pour les anions pour les campagnes 1, 2 et 4 avec une grande variabilité spatiale mise en évidence par l'écart-type, les valeurs minimales et maximales. Toutefois, les eaux de la campagne 3 présentent des concentrations en HCO_3^- élevées et des taux de Cl^- faibles certainement due à la recharge de la nappe. Les concentrations des ions SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ et dans une moindre mesure ceux de Na^+ sont plus élevées pour la campagne 4 résultant probablement de la dissolution des évaporites (gypse, halite), des minéraux de carbonatés (calcite, dolomie) et aussi du retour à la nappe des eaux usées.

Ainsi, la qualité des eaux souterraines dans la zone d'étude répond aux exigences de l'OMS, sauf dans certains endroits où les concentrations de NO_3^- , NH_4^+ , Cl^- , SO_4^{2-} sont relativement élevées. Ceci peut se justifier par la pression anthropique avec des activités tels que l'agriculture utilisant les fertilisants et pesticides ; et l'élevage à proximité des puits. De plus, les données de l'ensemble des quatre campagnes mettent en évidence les concentrations chimiques les plus fortes en fin saison sèche (campagnes 1 et 2) puis en saison (campagne 4), et les plus faibles en campagne 3 pour la plupart des éléments principaux, à l'exception du contenu en chlorure. Ces teneurs en ions majeurs les plus faibles et de conductivité électrique en moyenne $640 \mu\text{S}/\text{cm}$ suggèrent une dilution des eaux souterraines en Février provenant de la recharge différée de la nappe.

IX.1.2. Classification des familles chimiques et Minéralisation de la nappe : Approche statistique multivariée

IX.1.2.1. Détermination des familles chimiques par CH

L'analyse par CH a permis de distinguer quatre familles chimiques distinctes nommées C11 à C14 pour chaque campagne (cf Figure 3, Annexe V):

- la famille chimique 1 constituée uniquement par le puits 30 pour l'ensemble des 4 campagnes et un faciès Ca-SO_4 (cf Figure 4, Annexe V) et les valeurs CE élevées,
- la famille chimique 2 représentée uniquement par le puits 2 pendant la saison sèche puis s'étend aux points de mesure 8, 24, 27, 28, 7 et 18 pendant la saison humide. Ce groupe se caractérise par un faciès chimique Na-Cl et une minéralisation très variable allant de valeurs d'EC de 162 à $3\,500 \mu\text{S}/\text{cm}$.

- Les familles chimiques 3 et 4 se composent en fonction des sites et des saisons. Pendant la saison sèche, la famille 3 présente des eaux souterraines des sites situés principalement dans le secteur Ouest de l'aquifère avec des faciès mixtes (Cl-SO₄-Na-Ca). Cette famille d'eau évolue vers un faciès chimique Na-Cl avec une CE plus faible Février et en Octobre. Elle s'agrandit en y associant quelques sites du secteur centre de l'aquifère. La famille chimique 4 présente la minéralisation la plus faible de la zone d'étude avec des EC variant entre 313 et 635 µS /cm. Les faciès chimiques sont mixtes (Na-Ca-Cl-HCO₃) principalement situés dans les secteurs centre et ouest. Les eaux souterraines de Février n'ont pas permis de discriminer ces faciès ; cela peut s'expliquer probablement la recharge maximale au cours de cette période.

Les quatre familles chimiques identifiées indiquent en plus de la variabilité spatiale, une variabilité temporelle en fonction des caractéristiques chimiques à l'exception de la famille 1. Cette dernière, représentée par le site de Ndiop Sao (30) au sud-Ouest de la zone d'étude, se caractérise par une nappe peu profonde (4 à 5 m de profondeur), un faible pH (4-5) et un faciès chimique Ca-SO₄ fortement minéralisée. Ceci peut provenir de la dissolution des minéraux évaporitiques tel que le gypse. Cette partie de la région est géomorphologiquement représentée par d'anciennes mares saumâtres à salées qui ont été séchées en raison d'une forte évaporation. L'acquisition de la minéralisation Na-Cl mixte notée au niveau de la famille 2 peut être issue de l'intrusion marine pour certains sites localisée eu Nord de la bande côtière. Dans ces sites, la nappe est peu profonde et les valeurs de CE varient de façon saisonnière en fonction du niveau d'eau. Cependant, ce type d'eau peut aussi résulter des réactions d'échange de base avec les argiles due à un temps de séjour plus long associé à la présence d'aérosols et embruns marins, et des sources anthropiques. Les processus impliqués pour la famille 3 montrent une forte contribution des ions SO₄²⁻ issus certainement des gaz soufrés de l'industrie chimique des phosphates (produisant de l'acide phosphorique et sulfurique) opérant dans le secteur Sud-Ouest de la zone d'étude qui s'oxyde et atteint la nappe pendant l'infiltration d'eau de pluie auxquels s'ajoutent la dissolution du gypse dans la zone de Niayes. De plus, les teneurs en chlorures relativement élevées dans cette zone peuvent provenir des embruns marins et du retour à la nappe des eaux d'irrigation dans la zone de Niayes. La famille 4 est marquée par une faible minéralisation de l'ensemble des faciès d'eau situé dans les secteurs centre et Est de l'aquifère. Ceci reflète à la fois les réactions d'échange de cations et d'anions avec les roches encaissantes selon le sens d'écoulement des eaux avec un gradient décroissant où les concentrations en Na⁺ et Cl⁻ sont remplacés progressivement par celles en Ca²⁺ et HCO₃⁻. Toutefois, le faciès Ca-

HCO₃ qui caractérise les points de mesure dans l'aquifère calcaire à l'Est résulte principalement de la réaction de dissolution de la calcite.

IX.1.2.2. Evaluation des processus géochimiques par Analyse ACP

L'analyse statistique multivariée par ACP pour l'ensemble des données des 4 campagnes montre quatre classes de populations variables (sites d'échantillonnage) en relation avec les paramètres chimiques analysés (Figure 5, cf Annexe V). Ces classes nommées C1 à C4 sont présentées par:

- La classe C1 caractérisée par des concentrations élevées en ions SO₄²⁻ et en Ca²⁺ est représentée par le site 30 situé dans la partie sud de l'aquifère ;
- Classe C2 individualise le site 2 (teneurs élevée en Cl, Na⁺, K⁺) en fin de saison sèche, puis se compose des sites 8, 24, 27 de faciès SO₄-Cl-Ca-Na mixte ; et enfin elle renferme les sites 7, 26, 27, 28 de faciès chimique Na-Cl en mi-saison sèche;
- Les classes C3 et C4 se localisent à proximité de l'origine du repère notifiant une faible minéralisation et des faciès variables de Na-Cl, SO₄-mixte et Ca-HCO₃. Ils représentent des eaux souterraines situés dans le secteur centre et Est de l'aquifère.

La combinaison des approches CH et ACP permet la classification des familles chimiques des eaux souterraines et la mise en relation avec les processus hydrogéochimiques qui engendrent leur minéralisation. Cette mise en relation s'établit avec les paramètres chimiques, les points de mesures et la variabilité spatiale et temporelle de l'hydrochimie des sites d'échantillonnage pris individuellement ou en fonction des familles chimiques déterminées par les outils statistiques.

Les eaux souterraines en fin saison sèche (campagnes 1 et 2) sont de type Na-Cl à Na-mixte, principalement dans le secteur Ouest de l'aquifère, tandis que les types HCO₃-Na et HCO₃-Ca sont rencontrés dans les secteurs centre et Ouest. La plupart des eaux souterraines de la campagne 3 présentent des faciès bicarbonatés, en particulier du type HCO₃-Na dans le secteur Ouest et HCO₃-Ca dans le secteur Est, à l'exception du puits 30 situé au sud caractérisé par le type SO₄-Ca-Mg.

Les traitements statistiques ont été validés par les matrices de corrélations présentés en Annexe II. Ces matrices ont été réalisées à l'aide des coefficients de corrélation linéaire de Pearson. Ces coefficients représentent des covariances calculées sur les données centrées, c'est donc la covariance des variables comparées, standardisées par les variances.

Les matrices mettent en évidence une forte corrélation positive entre les variables Cl et Na de 0,99, 0,98, 0,95 et 0,97 respectivement au cours des deux campagnes en saison sèche 2010 et

2011, en mi-saison sèche et en saison humide de 2012. Cette analyse montre aussi une forte corrélation entre les ions Ca et Mg, SO_4 et Ca, SO_4 et Mg confirmant ainsi les faciès déterminés par les analyses statistiques réalisées.

Les changements saisonniers des faciès peuvent être issus des processus géochimiques tels que l'échange d'ions et les réactions de dissolution des roches et minéraux, et de dilution par infiltration des précipitations. Les diagrammes bivariés (cf Figure 7 (a,b), Annexe V) et les indices de saturation négatifs calculés de l'aragonite, de la calcite et de la dolomie (-0,27, -0,41 et -0,67) ont confirmé l'échange de bases, la dissolution des carbonates et des sulfates, en plus des intrants anthropiques de l'industrie minière, du retour à la nappe des eaux usées issus des rejets agricoles, domestiques et industriels contribuant à la pollution des eaux de la nappe. La corrélation positive entre les cations et le bicarbonate (Figure 7c- Annexe V) des eaux de la campagne 3 confirme la dilution avec l'eau de pluie atteignant la nappe phréatique. Le processus est régi par la pression partielle de CO_2 des sols qui avec l'eau de recharge conduit à la formation des ions HCO_3^- .

Dans le secteur Ouest, en particulier dans les dépressions de Niayes avec des eaux souterraines peu profondes (0 à 10 m), la dégradation de la matière organique et les processus d'échange des ions avec le complexe argilo-humique sont importants. À l'inverse, dans la partie Est, la dissolution des carbonates est dominante dans ce secteur karstique. De la partie centrale de l'aquifère vers la zone côtière, les changements saisonniers de types d'eau se produisent selon la direction principale d'écoulement. En effet, les réactions d'échange d'ions modifient progressivement les eaux souterraines minéralisées faibles des types d'eau Na- HCO_3 et Ca- HCO_3 dans le secteur centre vers des faciès Na-Cl vers l'Ouest. Ce processus s'accompagne de l'évaporation et d'un enrichissement en chlorure issu des aérosols et embruns marins ainsi que de la pollution anthropique. Cette dernière peut provenir de l'utilisation des pesticides tels que les organochlorés, des rejets industriels tels que les hydrocarbures, des rejets domestiques tels que les matières plastiques non recyclées et les polluants organiques persistants dans la chaîne alimentaire ainsi que la combustion et l'incinération des déchets.

IX.1.3. Sources de pollution et processus de minéralisation

Cette analyse a été réalisée à partir de la distribution des nitrates et sulfates en fonction des saisons mettant en évidence le processus de recharge de la nappe (Figure 8 Annexe V). Pour le sulfate, les concentrations plus élevées se produisent principalement dans le secteur Sud-Ouest de l'aquifère en milieu acide. Ces concentrations peuvent s'expliquer par la production des

acides phosphoriques et sulfuriques de l'industrie minière ICS, l'utilisation des engrais et des pesticides dans les zones agricoles de Niayes, la dégradation de la matière organique et dans une moindre mesure par la dissolution du gypse dans cet environnement peu profond des eaux souterraines (Singh et al., 1995, Hadas et al., 1999, Helena et al., 2000, Güler et al., 2012).

La distribution des ions NO_3^- varie de façon saisonnière et l'apparition de concentrations élevées pendant la saison sèche à l'Est, où la nappe phréatique est relativement profonde et de nombreux sites dépassent la limite autorisée de 50 mg/l par l'OMS. Ces concentrations pour la campagne 3 sont plus faibles, ce qui suggère une dilution à partir des eaux d'infiltration comme indiqué précédemment avec les types d'eau et les variations de la chimie de l'eau. Les niveaux élevés de nitrate sont particulièrement notés dans les zones agricoles des Niayes; ceux-ci peuvent être liés à l'utilisation des fertilisants, à l'infiltration des eaux d'irrigation et à la dégradation de la matière organique. L'apparition d'ammonium dans les sites 2 et 1 en saison sèche suggère des conditions anoxiques où la dégradation de la matière organique évolue vers la production de NH_4^+ (9,1 et 11,3 mg / l) et des valeurs élevées de carbone organique dissous total (10,7 et 7,7 mg /l).

IX.1.4. Isotopes environnementaux

Les isotopes environnementaux sont souvent associés aux techniques hydrogéochimiques classiques pour mieux comprendre l'origine des eaux souterraines de même que les processus de recharge, d'identifier les régimes d'écoulement des eaux, d'évaluer les paramètres de transport (Fritz et Fontes, 1979). Ces isotopes permettent également d'étudier les processus d'évaporation, la recharge, la géothermie qui affectent le cycle de l'eau du fait de la variation de sa composition isotopique initiale. Ils sont généralement considérés comme des traceurs conservateurs en aquifère peu profond pour appréhender le fonctionnement des systèmes hydrogéologiques (Gat, 1980, Fontes et Edmunds, 1989). Les traceurs les plus utilisés sont surtout les isotopes stables ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$) et l'isotope radioactif (T).

IX.1.4.1. Composition isotopique de l'eau de pluie

Les eaux pluviales des trois stations (Mboro, Kebemer, Potou) proches des sites pilotes enregistrent des valeurs mesurées des isotopes stables de $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ variables, de -7,8 à -1,7 ‰ pour $\delta^{18}\text{O}$ et de -56 à -8,3 ‰ pour $\delta^2\text{H}$ avec des moyennes de -5,2 et -34 ‰, respectivement. Les valeurs les plus faibles sont notées en Août et correspondent aux maxima des événements pluvieux. La Droite Météorologique Locale (DML) a pour équation : $\delta^2\text{H} = 7,7 \times \delta^{18}\text{O} + 5,9$;

$R^2 = 0,97$. Elle est proche de celle définie par Travi et *al.* (1987) des pluies de l'ensemble du Sénégal et de la Droite Météorologique Mondiale (DMM) par Craig (1961). C'est une indication que l'eau de pluie au Sénégal n'est pas évaporée pendant les précipitations en raison des événements pluvieux généralement courts et successifs.

Les teneurs en tritium varient entre 1,4 et 4,6 TU avec une moyenne de 2,7 TU. Cette gamme de valeurs sont aussi retrouvées dans la ville de Thiès (Madioune et *al.*, 2014) et de Dakar (Diedhiou et *al.*, 2011) et elles correspondent approximativement à celles de Leduc et *al.*, (1996) où les précipitations actuelles du Niger donnent des valeurs comprises entre 2 et 4 TU.

IX.1.4.2. Composition isotopique des eaux souterraines

La composition isotopique des eaux souterraines enregistre des valeurs de -5,5 à -3,1 ‰ et de -37 à -17 ‰ pour $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ avec des moyennes de -4,5 ‰ et -31 ‰, respectivement pour la campagne 3 de Février 2012. Les valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ varient de -5,5 à -3,5 ‰ avec une moyenne de -4,8 ‰ et des valeurs de $\delta^2\text{H}$ de -37 à -26 ‰ avec une moyenne de -33 ‰ pour la campagne 4 d'Octobre (cf Figure 9, Annexe V)

L'analyse du graphique $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ met en évidence un ensemble des points en dessous de la DML qui traduit un enrichissement en isotopes lourds par évaporation donnée par l'équation suivante (cf Figure 9-A, Annexe V) :

$$- \quad \delta^2\text{H} = 4,3 \delta^{18}\text{O} - 11,7 \text{ (Février, } R^2 = 0,98)$$

$$- \quad \delta^2\text{H} = 5,3 \delta^{18}\text{O} - 7,6 \text{ (Octobre, } R^2 = 0,96)$$

Les tendances observées indiquent donc les processus d'évaporation qui issus du fractionnement à la fois sur la surface du sol et pendant l'infiltration dans la zone non saturée. La contribution anthropique mise en évidence par les concentrations en ions NO_3^- dans la nappe peut également enrichir la composition isotopique des eaux souterraines.

Par ailleurs, les teneurs en tritium dans la nappe montrent des teneurs inférieures ou égales 0,7 allant jusqu'à 4,2 TU (cf Figure 9-B, Annexe V). Les eaux ayant les valeurs les plus faibles ($\leq 0,7$ TU) sont principalement situées dans la partie Nord de l'aquifère et suggèrent le temps de résidence des eaux souterraines de plus de 50 ans d'âge par rapport à la période des tests nucléaires. En effet, les concentrations détectables de tritium dans les eaux souterraines mettent en évidence la recharge ayant lieu après l'essai de la bombe nucléaire (1952-1953) ou le mélange des eaux entre celles issues des recharges récentes d'eau tritiée et celles d'avant 1952.

Cette observation est confirmée par les résultats de Gaye et Edmunds (1996) qui ont enregistré le pic de précipitation thermonucléaire de tritium dans la zone non saturée de Louga à des

profondeurs comprises entre 12 et 20 m lors de l'échantillonnage en 1989-1990; Ainsi, l'eau dans ces profondeurs avait déjà des âges de plus de 30 ans. Les auteurs supposent que la recharge se produit à travers le flux de piston, alors que les teneurs en ^3H détectables dans les eaux souterraines qui sont très semblables aux valeurs de l'eau de pluie témoignent de la recharge actuelle. La variabilité de ces concentrations peut être provenir de la circulation active des eaux souterraines ; et/ou de la dispersion et du mélange des eaux qui vont atténuer les teneurs en tritium. Cet isotope est un traceur conservateur et les changements dus à l'évaporation sont relativement faibles par rapport aux erreurs de mesure. Ces changements peuvent également être attribuables à la variabilité des taux de recharge qui dépend de la combinaison de facteurs tels que la géologie, le climat, les types de sol et leurs épaisseurs, et la profondeur de l'eau dans l'aquifère.

Ces résultats de géochimie isotopique obtenus dans l'article ont pu être approfondies dans la thèse par l'approche D-Excess, la détermination des processus de transfert et des sources de pollution.

IX.2. Processus géochimiques et Age des eaux: Approche D-Excess

Le paramètre « excès de deutérium » (d) représente la relation étroite entre le deutérium et l'oxygène-18 dans les eaux douces, y compris les précipitations qui donne lieu à la Droite Météorologique Mondiale d'équation $\delta\text{D} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$ déterminée l'ensemble des points. L'excès de deuterium sera défini par l'équation $d = \delta\text{D} - 8 \cdot \delta^{18}\text{O}$.

Il permet d'identifier la magnétitude relative du fractionnement cinétique de différents masses d'eau de comprendre la distribution des précipitations, les changements changements climatiques ainsi que les processus hydrologiques qui affectent ces eaux (West et al., 2014, Gupta & Deshpande, 2005).

Cette étude va permettre de comprendre la variabilité spatiale et saisonnière du d-Excess, de déterminer l'origine de ces eaux et d'évaluer leur âge. Ils vont également permettre de comprendre les processus géochimiques du transfert des eaux dans le sol.

IX.2.1. Eaux de pluie

La variabilité du D-excess dans les précipitations met en évidence une zone de Mboro avec des teneurs variant entre 4,5 et 11,8 ‰ avec en moyenne 8,3 ‰ (Figure 47). A Kébémér, elles varient entre 4,1 et 9,1 ‰ avec en moyenne 7,1 ‰. La station de Potou enregistre des taux de D-excess qui varient entre 4 à 8,3 ‰ avec une moyenne 6,8 ‰. De plus, les valeurs de D-

excess sont maximales à Mboro particulièrement au courant des mois d'Aout et de septembre. Elles sont plus faibles au mois de juillet particulièrement à la station Potou. Ainsi, la quantité de pluie, les sources locales d'humidité, l'altitude des points jouent un rôle prépondérant dans la variation du D-excess. Par ailleurs, les eaux de pluie enrichies en $\delta^{18}\text{O}$ donc plus évaporées sont enregistrées en Octobre à Potou. Cette distribution permet ainsi une meilleure compréhension des variations spatiales et temporelles de l'excès en deutérium et leur influence sur des précipitations actuelles.

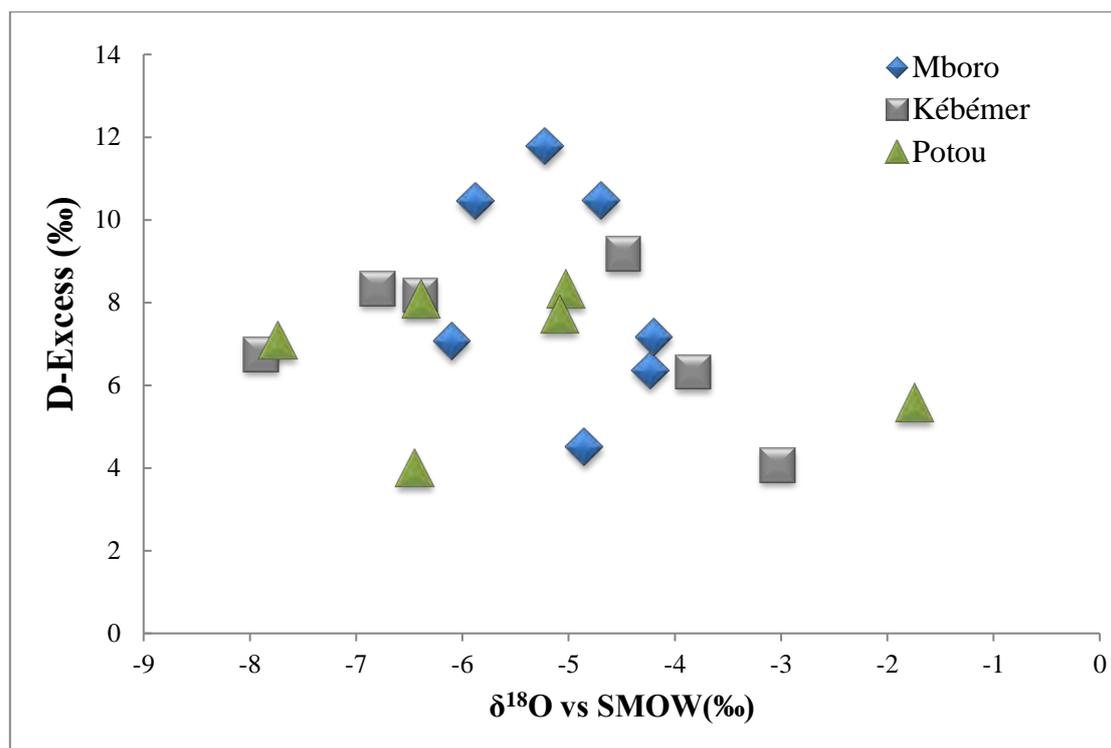


Figure 47 : Variabilité du D-excess au niveau des stations pluviométriques de Mboro, Kébémér et Potou

IX.2.2. Nappe

La variabilité des teneurs en isotopes stables en saison sèche et humide de 2012 a été mise en exergue dans les eaux souterraines du Littoral Nord précédemment dans l'article. Les tendances observées justifient les différents processus mis en jeu comme l'infiltration sélective, la percolation directe à travers des zones préférentielles à la recharge, le fractionnement à la fois sur la surface du sol et dans la ZNS ainsi que les mécanismes de mélange d'eaux par l'action anthropique.

De plus, la variabilité saisonnière du D-excess dans les eaux souterraines montre des teneurs variant entre -8,4 et 8,1 ‰ avec une moyenne 4,7 ‰ en saison sèche, et entre 0,8 et 8,1 ‰ avec

en moyenne 5,1 ‰ en saison humide (Figure 48-A). Les valeurs les plus faibles se localisent dans la zone des Niayes à l'Ouest et les valeurs élevées sont observés à l'Est au niveau des piézomètres profonds.

Les faibles valeurs de D-excess (< 5‰) peuvent se justifier par la combinaison entre une forte évapotranspiration et des types de sols peu perméables facilitant l'évaporation avant la recharge. Les D-excess élevées (> 5‰) est plutôt héritée des précipitations ayant une composante cinétique d'une vapeur d'eau ré-évaporée. Ainsi, les forts taux de D-excess sont certainement dus à une augmentation du recyclage de l'humidité de l'air introduite à partir de sources plus locales (Deborah, 2014).

Par ailleurs, l'analyse de $\delta^{18}\text{O}$ et Cl (Figure 48-B) a montré l'effet de la saison et de l'action anthropique sur la signature isotopique des eaux de la nappe. Cette influence est plus marquée en saison humide qu'en saison sèche. Aussi, une tendance de stabilisation des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ est observée entre -5,5 et -4 ‰ alors que les concentrations en Cl augmentent dans les zones dépressionnaires agricoles à l'exception des sites de Lompoul et Darou Khoudouss qui présentent des teneurs très enrichies en isotopes lourds donc très évaporées. Ceci témoigne que la zone du Littoral Nord présente des eaux souterraines faiblement chargées avec une forte activité anthropique dans les zones humides agricoles.

Cette analyse met en évidence l'impact de l'effet de dilution et de dissolution des minéraux en principalement saison humide (Postma et Appelo, 2005) ainsi l'impact anthropique dans les zones dépressionnaires (Nyenje et al., 2013, Diehdhiou, 2011).

En effet, la faible corrélation entre ces deux paramètres prouve que même si le processus d'évaporation constitue un facteur important dans la minéralisation des eaux, son effet sur la salinité serait limité. Les travaux de Payne et al., (1979) indiquent que l'augmentation de la salinisation de la nappe serait principalement liée à la dissolution des minéraux, au lessivage des sels accumulés dans la ZNS, au transfert de la pollution et au retour des eaux usées et d'irrigation vers la nappe. De plus, l'augmentation des teneurs en chlorure peut être due à l'utilisation des fertilisants et pesticides dans les zones agricoles des Niayes comme cela a été précédemment démontrée avec les données hydrochimiques de la nappe (cf Chap. VIII.3.1).

Ainsi, il se distingue une certaine homogénéisation des valeurs de $\delta^{18}\text{O}$ avec le mélange des différents processus au cours de l'infiltration combinée avec l'évaporation, la transpiration des végétaux et la dissolution des minéraux évaporitiques qui peuvent conduire à l'augmentation de la salinité sans fractionnement isotopique comme le confirme les travaux de Faye et al., (2005).

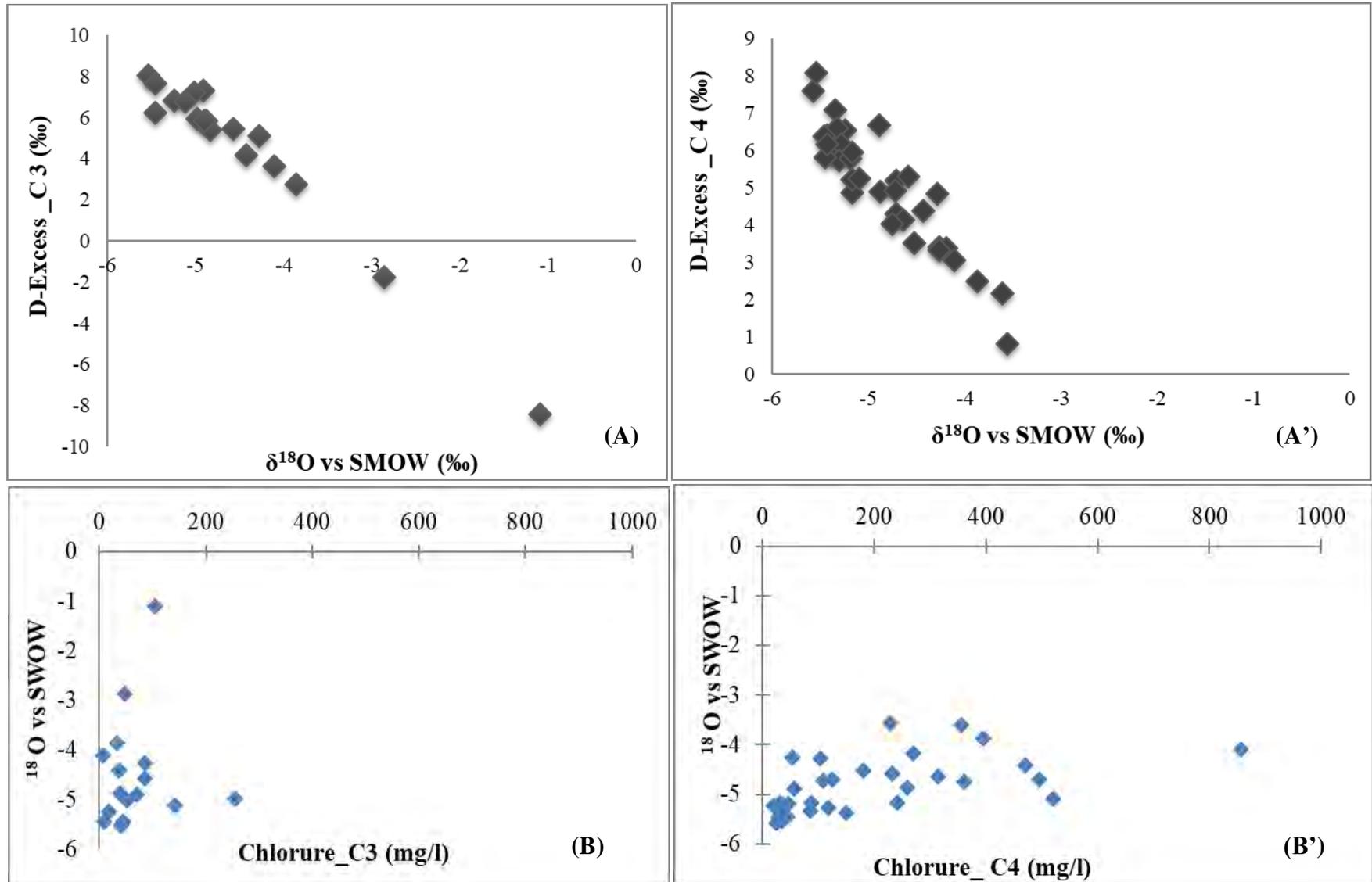


Figure 48 : Variabilité saisonnière du D-Excess dans la nappe du littoral Nord (A-A') et Diagramme binaire Cl_ $\delta^{18}\text{O}$ (B-B') en saison sèche (C3) et en saison humide (C4)

La variation du $\delta^{18}\text{O}$ en fonction de la profondeur de l'eau dans le sol (Figure 49) montre que les parties profondes de la nappe présentent des eaux moins enrichies en isotopes lourds que les zones peu profondes (< 10 m) qui sont plus enrichies. Aussi, le fractionnement isotopique par l'évaporation se manifeste au niveau de certaines dépressions des Niayes en saison sèche.

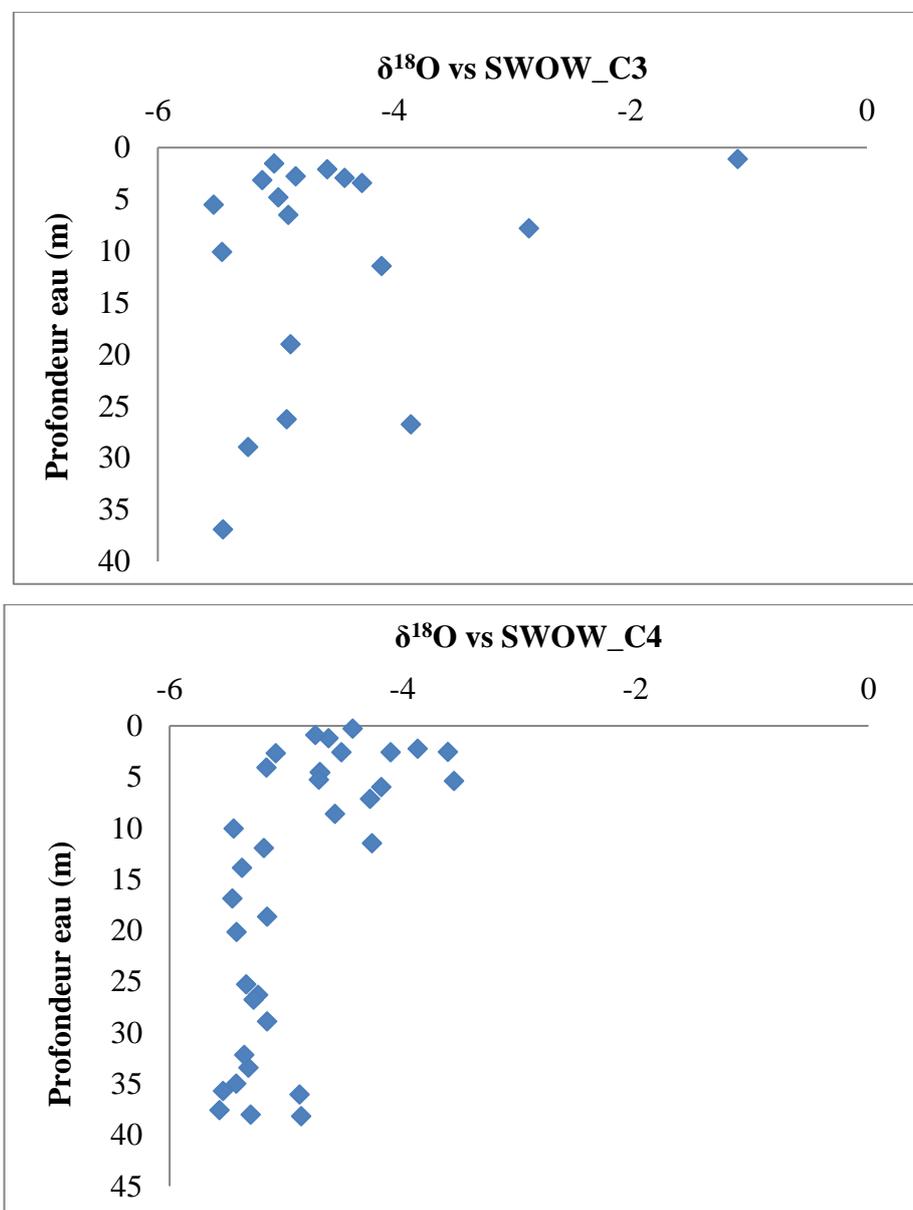


Figure 49 : Diagramme binaire Profondeur de l'eau vs $\delta^{18}\text{O}$ en saison sèche (C3) et en saison humide (C4)

De plus, l'évolution $\delta^{18}\text{O}$ vs UT montre un gradient Nord-Sud pour la composition des eaux de pluie en tritium (Figure 50). Elle montre une atmosphère plus chargée dans le secteur Nord qu'au Sud. Elle met aussi en évidence une désintégration du tritium avant qu'il atteigne la nappe. Les pluies de Potou présentent de faibles teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ et de fortes valeurs de tritium

alors les pluies de Mboro sont plus enrichies en $\delta^{18}\text{O}$ et proche de celle des eaux souterraines de la zone d'étude. Ainsi, la localisation géographique et l'effet de continentalité jouent un rôle important sur la signature isotopique des eaux souterraines.

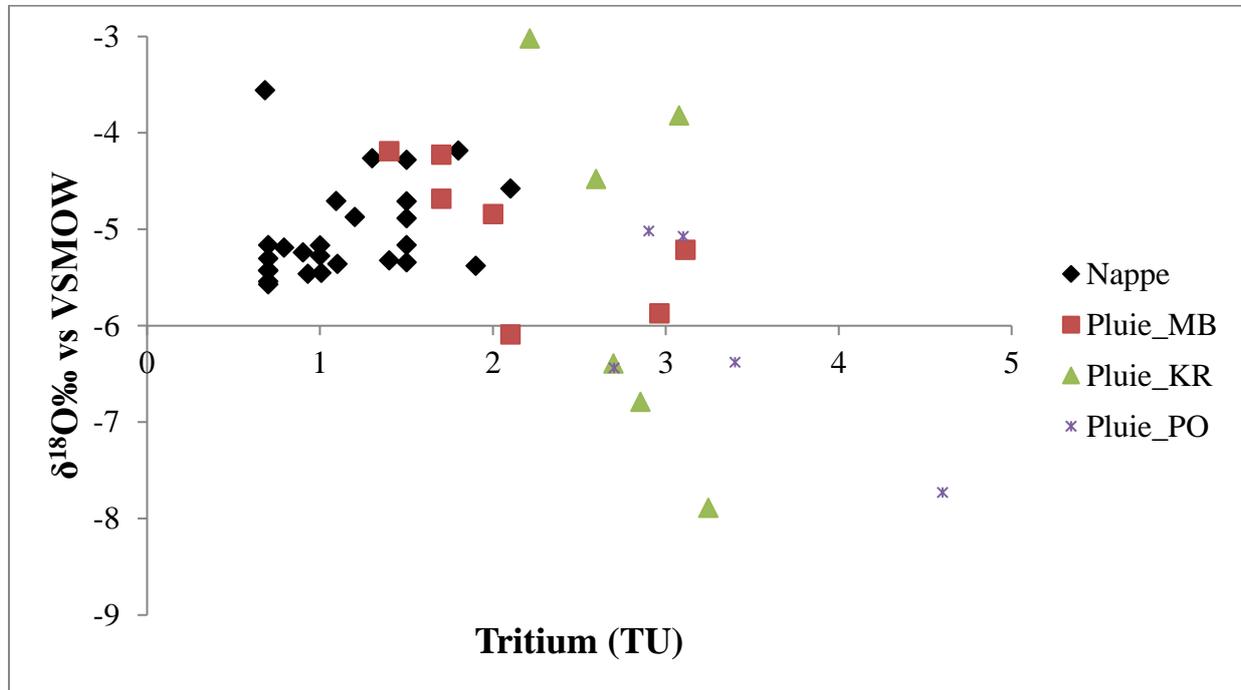


Figure 50 : Distribution ^{18}O vs Tritium dans les pluies et la nappe en saison humide (2012)

Ces eaux souterraines présentent une distribution spatiale irrégulière du Tritium notifiant une hétérogénéité des processus de recharge de la nappe (cf Figure 9B, Annexe V). Les teneurs de ^3H varient entre 0,7 à 4,2 TU comme l'on démontré dans l'article et suggèrent des temps de séjour des eaux souterraines de plus de 50 ans. Toutefois, en se basant sur les travaux de Scholl (1996), une segmentation plus fine peut être déterminée :

- les zones centre et Nord-Est (< 0,8 TU) présentent des eaux anciennes d'âge de plus de 50 ans ;
- les zones Sud et Nord-Ouest (0,8-1,8 TU) referment des eaux anciennes d'âge entre 50 et 35 ans ;
- les sites particuliers situés de Ndeune et MDL au Sud-Ouest et Potou au Nord (1,8 - 3,5 TU) mettent en évidence des eaux récentes d'âge comprises entre 0 à 17 ans ;
- la zone de Mbako Lo au Sud Est (> 3,5 TU) est d'âge intermédiaire 18-25 ans.

La variabilité du temps de résidence des eaux est principalement due à la quantité d'eau de pluie infiltrée plus importante au Sud (44 mm) qu'au centre (4 mm) et au Nord (3 mm) du secteur. Elle est aussi dû aux types de sol plus silteux au Sud et dans les Niayes le long de côte, et sableux au Nord et à l'Est ainsi que leurs épaisseurs plus faibles en quittant la côte à l'Ouest (2,9 m à Mboro) vers l'intérieur des terres (37,7 m à Kab Gaye).

IX.2.3. Détermination des sources et processus de transfert

Les eaux de pluie ainsi que les eaux souterraines peuvent être affectés par différents facteurs affectant leur composition isotopique. En effet, la détermination des processus de transfert et leur source sont nécessaires à la compréhension du fonctionnement géochimique du système aquifère. Les pluies sont la principale source de renouvellement des eaux souterraines dans l'aquifère des sables quaternaires du littoral Nord. Elles représentent une fonction d'entrée primordiale et par conséquent, la connaissance de sa variation spatiale et saisonnière est indispensable à la compréhension de ce système aquifère.

Les processus isotopiques comprennent ainsi un fractionnement à l'équilibre thermodynamique auquel peut s'ajouter un fractionnement cinétique pour un processus irréversible de pente < 8 (Olive, 1995). Le facteur d'enrichissement isotopique expérimental va dépendre des conditions du milieu dans lequel s'effectue le processus d'évaporation et notamment de la température et de l'humidité de l'air.

Suivant le régime pluviométrique, l'intensité de l'évaporation, la texture et l'épaisseur de la ZNS, l'eau de recharge présente une signature isotopique différente ou analogue à celle de l'eau de la pluie. Les teneurs isotopiques des précipitations qui arrivent au sol peuvent subir d'importantes modifications sous l'effet de plusieurs facteurs tels que:

- la température : Elle influe le plus sur la composition isotopique des précipitations. Cette dernière dépend non seulement de la température à laquelle les eaux océaniques se sont évaporées mais surtout de la température à laquelle les précipitations ont condensé dans les nuages (Etcheverry, 2002). Cette dépendance à la température entraîne une variation saisonnière de la composition isotopique des précipitations.
- l'altitude : les précipitations recueillies en haute altitude sont généralement appauvries en isotopes lourds que celle en basse altitudes. Cependant, il est important de tenir compte de la variabilité des gradients isotopiques et de s'assurer que l'évaporation n'a pas entraîné une modification de la composition isotopique des eaux.

- l'effet de continentalité : lors du déplacement des nuages vers l'intérieur du continent, la vapeur d'eau d'origine océanique, soumise à des condensations successives, s'appauvrit en isotopes lourds suivant le modèle de distillation fractionnée de Rayleigh (Dansgaard, 1964). Ainsi, un gradient isotopique de continentalité peut être variable en fonction de la position géographique et de la distance à la côte.

Dans la zone du Littoral Nord, le gradient de continentalité peut être lié à l'éloignement des points échantillonnés de la côte. Ainsi il suit le gradient Kebemer > Mboro > Potou. Cependant, cet effet est souvent masqué par les variations saisonnières locales.

- l'effet de masse: au cours de différents événements pluvieux, la composition isotopique des précipitations est plus appauvrie en isotopes lourds durant les mois les plus pluvieux. Par contre, les plus faibles précipitations, généralement recueillies au début et à la fin de la période pluvieuse, présentent les teneurs les plus riches en isotopes lourds.

Ainsi, les eaux souterraines peuvent donc conserver le signal isotopique de la précipitation. Cependant, divers facteurs peuvent influencer la signature isotopique de la nappe comme la lithologie des sols rencontrés lors de l'infiltration le long de la ZNS, la structure de l'aquifère et le temps de résidence des eaux dans celui-ci.

De plus, l'excès en deutérium dépendant de la température et de l'humidité relative a permis d'identifier la vapeur atmosphérique recyclée localement qui se manifeste à la station de Mboro. D'autres processus telles que l'évaporation et la condensation peuvent induire un fractionnement isotopique des eaux de pluie entraînant un enrichissement en isotopes lourds (Fontes *et al.*, 1991; Clark et Fritz, 1997). Ainsi, dans le secteur du Littoral Nord, la variabilité de la composition isotopique des eaux peut donc être due (i) aux variations naturelles de la composition isotopique des pluies (Travi *et al.*, 1987, Mook, 2000), (ii) au phénomène d'évaporation (Gonfiantini, 1985, Kendall & McDonnel, 1998) et (iii) aux processus de mélange de différents types d'eau (Scholl, 1996, Negrels *et al.*, 2003). En effet, la distribution des teneurs isotopiques de la nappe provenant du fractionnement par évaporation peut suggérer un mélange des eaux de recharge avec d'autres sources anthropiques telles que les eaux usées provenant des activités agricoles, domestiques, pastorales et industrielles. Ceci se manifeste principalement dans la zone des Niayes davantage en saison sèche qu'en saison de pluie.

Conclusion chapitre du chapitre IX

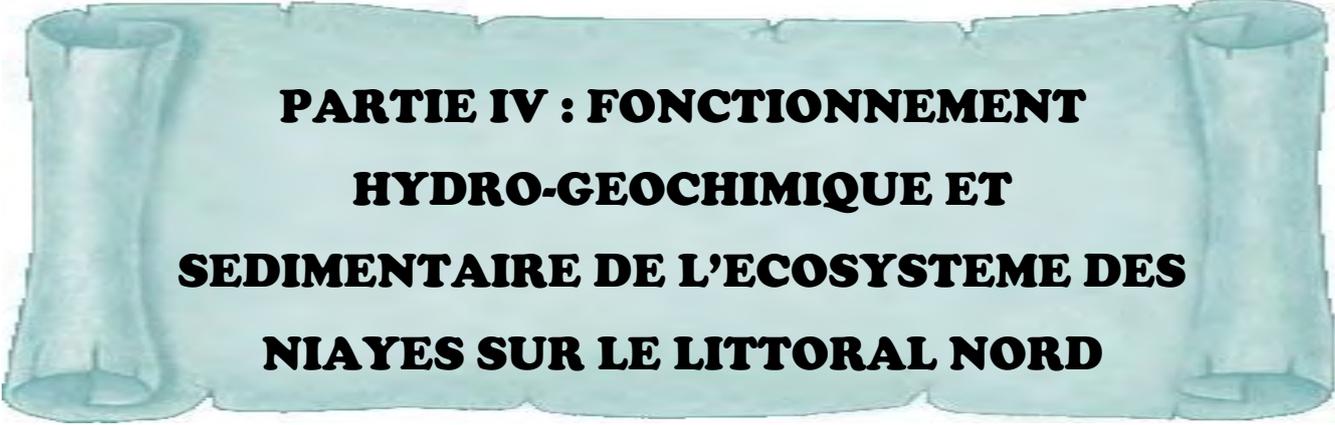
Cette étude a donc permis de faire une réévaluation qualitative de la nappe du Littoral Nord. A l'échelle globale, la nappe présente en saison sèche un faciès chloruré sulfaté sodique, en mi-saison sèche le faciès est plutôt bicarbonaté sulfaté calcique et enfin en saison humide il devient chloruré sulfaté calcique et magnésien. Ces eaux présentent des conductivités variant entre 162 $\mu\text{s/cm}$ en saison humide et 3590 $\mu\text{s/cm}$ en saison sèche. Le pH de ces eaux est généralement acide et varie entre 3,6 et 9,6 avec une moyenne de 6,2.

Les outils statistiques (Classification Hiérarchique par Dendrogramme et Analyse en Composantes Principales) ont permis de réaliser une classification des familles chimiques des eaux souterraines, de déterminer leur faciès, les processus géochimiques et l'origine de leur minéralisation. En effet, quatre familles chimiques ont été identifiées avec des faciès chimiques généralement Ca-SO₄, mixte-Cl/SO₄, Na-Cl, mixte-Cl et mixte-HCO₃. Ces eaux sont affectées par des processus de minéralisation liés d'une part à des phénomènes naturels tels que les échanges de base, l'évaporation, l'hydrolyse des minéraux argileux, la dissolution des minéraux; et d'autre part des activités anthropiques tels que les rejets agricoles, domestiques et industrielles. Ces effets naturels et anthropiques ainsi les paramètres climatiques et physiques du milieu contribuent à la variabilité spatiale et temporelle de l'hydrochimie de la nappe. Dans le secteur Ouest de la bande côtière, les eaux souterraines se caractérisent par des fortes valeurs en EC et en ions SO₄²⁻. Dans les secteurs centre et Est de l'aquifère, les eaux souterraines sont moins minéralisées et les faciès chimiques évoluent spatialement et temporellement d'un type d'eau Ca-HCO₃ vers un faciès Cl-mixte. Cette tendance semble être contrôlée par des réactions d'échange d'ions où Na⁺ et Cl⁻ sont progressivement remplacés par Ca²⁺ et HCO₃⁻ suivant le sens d'écoulement principal des eaux et le gradient croissant du niveau de la nappe du Nord au Sud. Ces réactions d'échange d'ions modifient donc progressivement les eaux souterraines faiblement minéralisées de faciès Na-HCO₃ et Ca-HCO₃ dans le secteur centre vers des faciès Na-Cl vers l'Ouest. Ce processus s'accompagne de l'évaporation et d'un enrichissement en chlorure issu majoritairement de la pollution anthropique mais aussi de l'intrusion marine et des aérosols et embruns marins en plus faibles proportions.

Les isotopes environnementaux ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, ^3H) montrent des eaux récentes issues de l'infiltration directe des eaux de pluies. Les eaux souterraines sont affectées par un fractionnement isotopique dû à l'évaporation principalement mais aussi à des mélanges d'eau de composition différente. La variabilité du D-Excess a mis en évidence une humidité de l'air

recyclée particulièrement à Mboro au cours des mois d'Aout et de septembre ainsi que l'effet de l'évapotranspiration dans les zones humides agricoles. Les valeurs de Tritium varient en moyenne de 1,4 à 4,6 TU dans les eaux de pluie, et de 0,7 à 4,2 TU dans les eaux de la nappe. Ces dernières témoignent des eaux pouvant avoir plus de 50 ans d'âge par rapport au pic nucléaire des années 1952-1953. Différentes sources tels que la température, les effets de continentalité, de masse et d'altitude peuvent influencer sur la composition chimique et isotopique de ces eaux souterraines.

Le secteur Nord du Littoral Nord reste très sensible à l'intrusion marine alors que les secteurs centre et Sud sont soumis en plus de la forte exploitation de la ressource à une pression anthropique immense. La nappe du Littoral Nord est ainsi exposée à la dégradation de sa qualité chimique principalement dans la partie Ouest superficielle alors que la partie Est plus profonde est moins vulnérable.



**PARTIE IV : FONCTIONNEMENT
HYDRO-GEOCHIMIQUE ET
SEDIMENTAIRE DE L'ECOSYSTEME DES
NIAYES SUR LE LITTORAL NORD**

**PARTIE IV : FONCTIONNEMENT HYDRO-GEOCHIMIQUE ET SEDIMENTAIRE DE
L'ECOSYSTEME DES NIAYES SUR LE LITTORAL NORD**

Les zones humides sont des terres saturées en eau dont la composition physico-chimique peut être modifiée par le lessivage des sols. Elles abritent une végétation luxuriante tolérante à l'eau et une activité biologique variée qui sont adaptées à cet environnement humide (Alberta Wetlands Policy, 2013). Dans ces zones, la saturation en eau est le facteur déterminant la nature et le développement des sols, les types de plantes et les communautés vivant dans le sol et en surface (Cowardin et *al.*, 1979). Elles couvrent environ 9 % des surfaces terrestres et accumulent 35 % du carbone organique terrestre (Mitra et *al.*, 2005) principalement due à la grande productivité des plantes combinée au lent taux de décomposition en dessous des conditions de saturation en eau (Redday et DeLaune, 2008). Les fonctionnalités importantes de ces milieux sont la rétention de l'azote et la séquestration du carbone atmosphérique (Martina et *al.*, 2014, Zedler, 2003) ; les deux pouvant être reliés par l'accumulation et la transformation de la Matière Organique (MO).

Les zones humides localisées sur le littoral Nord du Sénégal appelées « Niayes » représentent un écosystème particulier car elles fournissent 80 % de la production horticole nationale contribuant ainsi à la croissance socio-économique du pays. Cette zone côtière est caractérisée par un climat plus adouci que le climat sahélien et soudano-sahélien à cause de la proximité de la mer, une faible profondeur de la nappe, une végétation luxuriante et un fort potentiel agricole. Cependant, ces zones très vulnérables sont aujourd'hui menacées par la forte pression anthropique, les changements climatiques et environnementaux associés au développement du secteur minier.

Au cours de ces dernières décennies, il a été constaté une diminution de la biodiversité végétale naturelle des Niayes (Faye et *al.*, 2014) au profit du développement l'activité maraîchère le long de la côte Nord, une dégradation de la qualité des eaux souterraines au niveau des dépressions inter-dunaires (Kaba et *al.*, 2016, Kane, 1995). Ceci est causé par une forte pression anthropique sur ces écosystèmes agricoles et côtiers influençant ainsi la qualité de la ressource en eau souterraine et celle des sédiments.

L'intérêt de l'étude de la géochimie des sédiments et de la matière organique dans la zone des Niayes est d'investiguer les facteurs explicatifs de l'acidité des sols, la minéralisation de la nappe, la typologie des faciès, les fortes teneurs en sulfates, nitrates et ions mineurs (Al, Fe, Mn) dans les ouvrages implantés à l'intérieur et à proximité de cet écosystème.

**PARTIE IV : FONCTIONNEMENT HYDRO-GEOCHIMIQUE ET SEDIMENTAIRE DE
L'ECOSYSTEME DES NIAYES SUR LE LITTORAL NORD**

Ainsi donc, ce chapitre vise essentiellement à comprendre le fonctionnement spatio-temporel sédimentaire, chimique et hydrogéochimique de l'écosystème des Niayes. Et les objectifs spécifiques sont de :

- déterminer les faciès sédimentologiques et minérologiques
- évaluer quantitativement et qualitativement la matière organique
- étudier la chimie et la géochimie des eaux interstitielles le long de la zone non saturée
- identifier les formes de phosphore et quantifier les flux de nutriments à l'interface eau-sédiment
- établir les relations entre la chimie des eaux et la qualité des sédiments, l'origine et le devenir de la matière organique ainsi que leurs interactions avec l'environnement.

Cette partie aborde ainsi l'étude sédimentologique et hydrogéochimique des zones humides sur trois sites pilotes représentatifs (Mboro, Lompoul et Potou) du Littoral Nord disposés suivant un gradient Sud-Nord. Elle comprend trois chapitres qui traite successivement : l'étude granulométrique, minéralogique et géochimique des sédiments, la chimie et géochimie isotopique des eaux interstitielles de la zone des Niayes, l'étude des processus de dégradation et origine de la matière organique de la Niaye de Mboro.

Un accent particulier est mis sur l'étude de la Niaye de Mboro où les variabilités physiques, chimiques et géochimiques selon un transect Versant-Centre-Bas-fond dans la dépression sont investiguées pour comprendre les processus à une échelle fine. Dans cette partie, la quantité, la qualité, les types et les sources de la matière organique ont été largement discutés ainsi que les formes de phosphore et la quantification des flux de nutriments à l'interface eau-sédiment.

Ces investigations spécifiques tentent de répondre à la question relative à l'influence des facteurs sédimentaires et hydrogéochimiques sur la variabilité spatio-temporelle à l'échelle locale des sites pilotes et régionale.

La stratégie d'échantillonnage a été de prélever au niveau des stations versant et centre de chacune des trois zones humides de Mboro, Lompoul et Potou au cours de trois campagnes effectuées en fin de saison sèche, en milieu de saison sèche et en saison humide. La figure 51 montre ainsi une coupe schématique d'une zone humide littorale ainsi que son type de végétation et présente les stations étudiées.

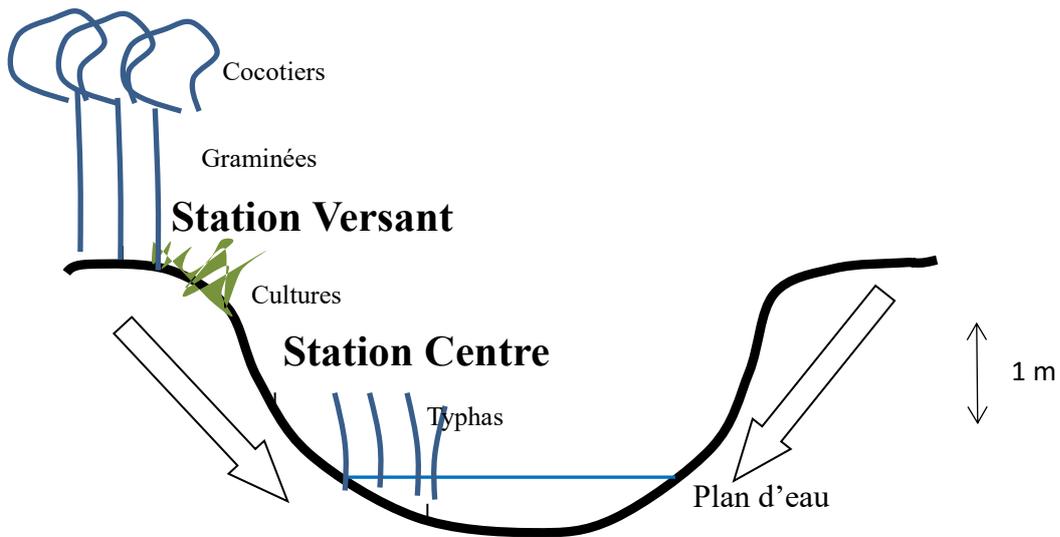


Figure 51 : Coupe schématique d'une Niaye et des stations d'échantillonnage

Chapitre X : Etude granulométrique, minéralogique et géochimique des sédiments

X.1. Distribution granulométrique au niveau des trois sites pilotes

L'analyse granulométrique dans les sédiments des Niayes particulièrement au niveau des stations centres met en évidence différentes tailles de particules dominantes le long des profils (Figure 52, Annexe VI). Elle révèle des modes différents pour l'ensemble des profils allant généralement du mode plurimodal au mode unimodal. L'ensemble des paramètres (moyenne, médiane, standard deviation, les indices de Skewness et Kurtosis) montre que les sols sont hétérogènes en fonction de la profondeur relativement bien classés avec une asymétrie à tendance grossière beaucoup plus à Potou qu'à Lompoul et à tendance plus fine à Mboro.

Ces résultats montrent des types silto-sableux à sableux des sols sur l'ensemble du secteur avec exceptionnellement à Mboro un caractère silteux à sablo-silteux.

A Mboro, les particules de la station centre mettent en évidence une série plurimodale avec un pic remarquable à 200 μm à l'exception de la profondeur 25-50 cm où le pic le plus important est à 15 μm . Sur le versant, les particules forment une série unimodale à 200 μm de 0 à 50 cm de profondeur, un pic de particules fines à 15 μm de -50 à -75 cm suivie d'une série tri-modale avec des pics de 20, 200 et 600 μm en moyenne de -75 à -200 cm (Annexe VI).

A Lompoul, le centre de la Niaye présente une série plurimodale de 0 à -50 cm et bi-modale de -50 à -100 cm avec des pics à 200 et 700 μm . Sur le versant de Lompoul, le profil présente des particules assez hétérogènes de 0 à -25 cm, une série bimodale à 200 et 800 μm de -25 à -75 cm et unimodale à 200 μm de -75 à -175 cm (Annexe VI).

A Potou centre, la série est trimodale à 20, 300 et 100 μm de 0 à -25 cm, puis de -25 à -50 cm elle présente deux pics à 300 et 2000 μm qui s'homogénéise en profondeur à une série unimodale à 200 μm de -50 à -75 cm. Sur le versant de Potou, la série est homogène mettant en évidence un pic à 200 μm le long du profil ZNS 5 (Annexe VI).

L'analyse granulométrique en fonction de la profondeur (Figure 50) montre pour le centre des Niayes de Lompoul et Potou ainsi que le versant Lompoul une diminution des particules silteuses et argileuses et une augmentation des sables très fins et fins. Pour le versant de Potou, une dominance des particules sableuses fines est observée avec une variation des quantités silteuses et argileuses dont le pourcentage varie de 12 à 2 % le long du profil.

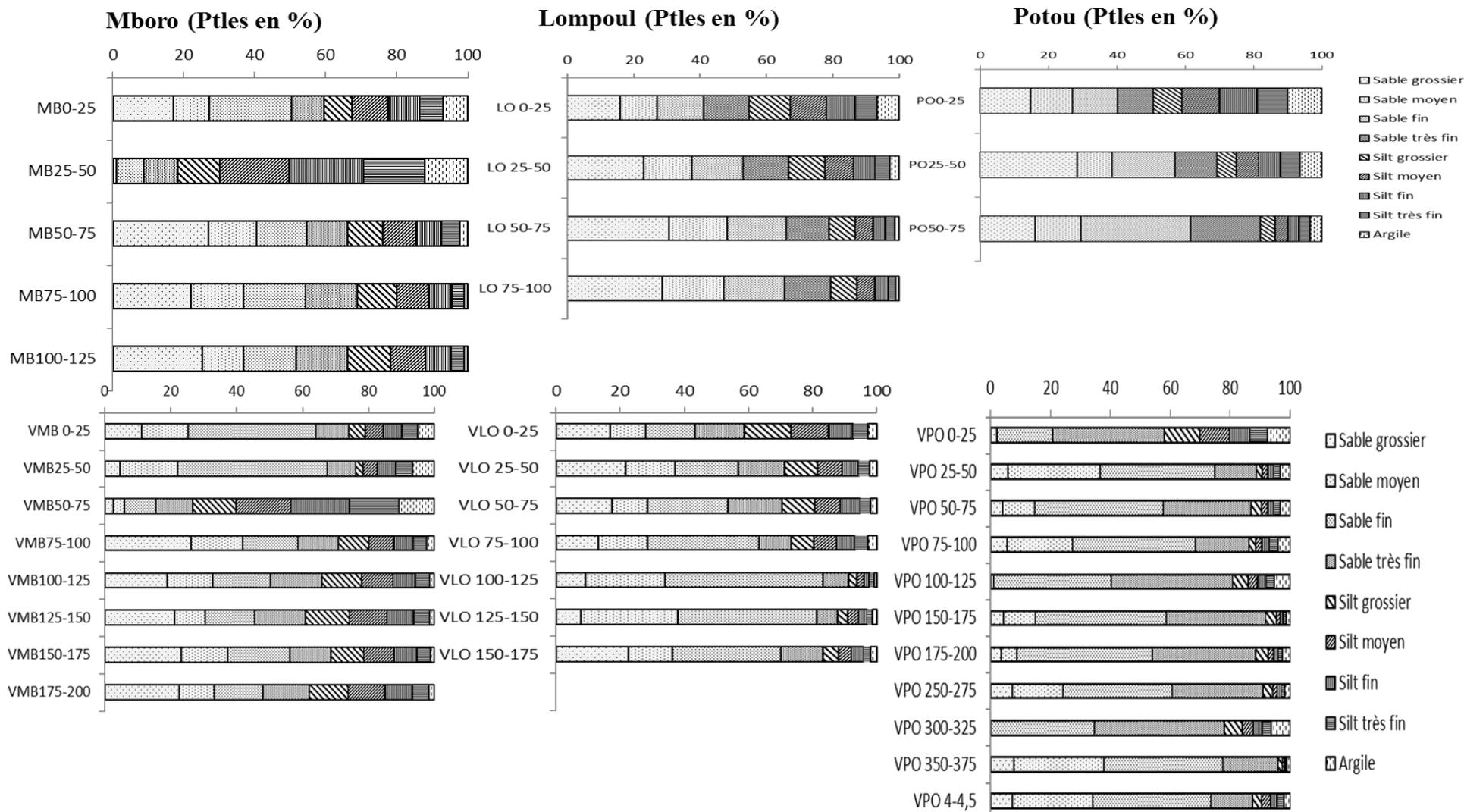


Figure 52 : Distribution granulométrique en fonction de la profondeur dans les centres et sur les versants des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou (juin 2011)

**PARTIE IV : FONCTIONNEMENT HYDRO-GEOCHIMIQUE ET SEDIMENTAIRE DE
L'ECOSYSTEME DES NAIYES SUR LE LITTORAL NORD**

Le site de Mboro présente une variation spécifique de la taille des particules avec les teneurs les plus importantes en silts et argiles qui atteignent 90 % aux profondeurs 25-50 cm dans la station Centre et 50-75 cm dans la station versant.

L'ensemble des sites de notre zone d'étude met donc en exergue des tailles de particules variant entre un pôle silteux et un pôle sableux.

A Mboro, les sols sont sablo-silteux à silteux avec des teneurs en argile plus importantes que les deux autres sites de Lompoul et Potou. Ces derniers présentent des sédiments plus sableux à silto-sableux beaucoup plus dans le centre de la Niaye que sur le versant.

Les quantités de silts et d'argiles décroissent généralement en fonction de la profondeur à l'exception du site de Mboro aux profondeurs 25-50 cm et 50-75 cm respectivement dans le centre et sur versant de la Niaye.

L'analyse du diagramme ternaire (Figure 53) montre trois pôles :

- un pôle sableux essentiellement sur le versant de Potou
- un pôle silto-sableux particulièrement pour les stations centre des trois Niayes (Mboro, Lompoul et Potou) et les versants de Mboro et Lompoul
- un pôle silteux au niveau Mboro des stations centre et versant à des profondeurs particulières.

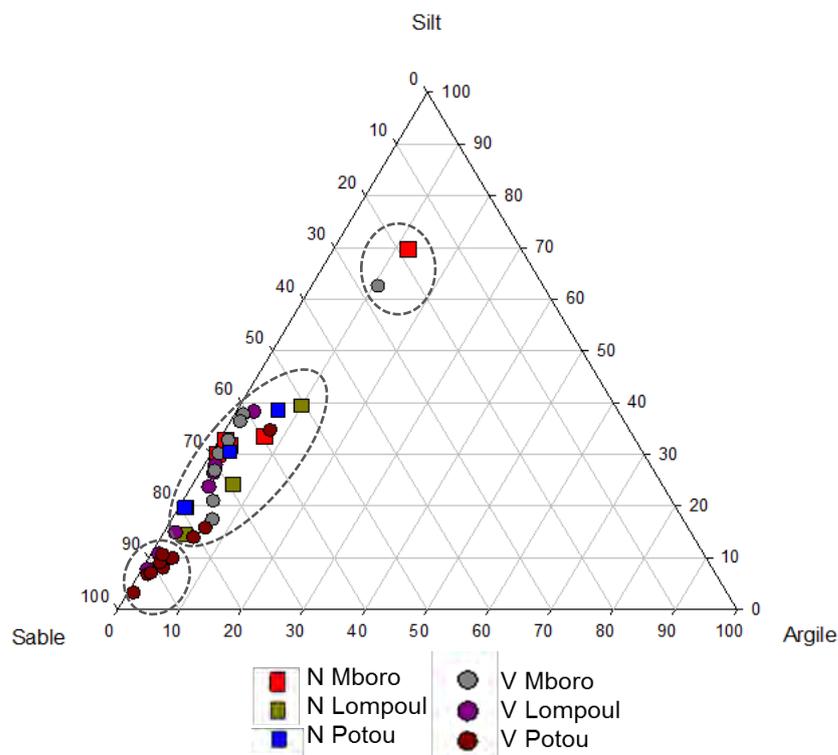


Figure 53 : Diagramme ternaire de la distribution granulométrique des sédiments dans les stations du versant (V) et du centre (N) des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou (juin 2011)

X.2. Cortège de minéraux argileux des Niayes

Les minéraux argileux des sédiments des Niayes montrent une dominance de la Kaolonite et de l'illite sur l'ensemble des échantillons analysés. Les minéraux argileux moins dégradés de type Smectite, Chlorite et Vermiculite généralement présents en Surface se distinguent en faible quantité.

Les résultats de l'analyse au Diffractomètre Rayons X montrent une plus grande diversité des minéraux argileux à Mboro et principalement en surface. Ils montrent la présence de Kaolinite, l'illite et Interstratifiés Vermiculite-Smectite ou Chlorite-Vermiculite en surface qui en profondeur évoluent au stade de Kaolinite. Pour les stations centre et versant Niayes de Lompoul et Potou, les minéraux argileux sont représentés principalement par la Kaolinite souvent associée à l'illite (Annexe VII). On observe spécifiquement la Chlorite dans le centre de la Niaye de Potou à la profondeur 25-50 cm.

Les résultats de la semi-quantification montrent principalement dans les sols de Mboro de la Kaolinite, de l'illite et des Interstratifiés (Figure 54). Les interstratifiées diffèrent en fonction de la profondeur et de la position dans le site. Dans la station centre de la Niaye, de 0 à 25 cm, on retrouve des interstratifiés Vermiculite-Smectite, de 25 à 50 cm dans le centre et sur le versant, on enregistre les interstratifiés Chlorite -Vermiculite (Figure 54). Pour les sites de Lompoul et Potou, cette analyse n'a pas été possible du fait d'une part de la faible quantité de minéraux argileux principalement à Potou et d'autre part des fortes teneurs en tourbes principalement à Lompoul.

La Kaolinite représente en moyenne 60 % des minéraux argileux pour l'ensemble des profils, l'illite 14 % et les interstratifiés 27 %. L'illite est dominante en surface alors que les interstratifiés le sont sur la tranche de sol de 25 à 50 cm de profondeur. Ceci peut justifier le fait que le processus de pédogénèse est plus rapide à la surface du sol exposée à toutes les pressions et réactions chimiques.

Ainsi, les argiles sont faiblement représentées (inférieur 15 %) dans l'ensemble des profils de zone non saturée avec des teneurs décroissantes de la surface du sol à la frange capillaire. Ce cortège est majoritairement représenté par de la Kaolinite.

L'étude de Fall (1986) a mis en exergue une évolution minéralogique des niveaux de vases silto-argileuses et silto-sableuses au niveau des Niayes. Les mêmes tendances sont observées avec de bas en haut la kaolinite devenant moins abondante, plus cristallisée, l'illite ouverte constante, les interstratifiés suivis plus haut par la vermiculite. Toutefois, la vermiculite des vases silto-sableuses est suivie au sommet par de la smectite et de la palygorskite. Cette

**PARTIE IV : FONCTIONNEMENT HYDRO-GEOCHIMIQUE ET SEDIMENTAIRE DE
L'ECOSYSTEME DES NIAYES SUR LE LITTORAL NORD**

tendance évolutive semblable dans les deux litho-faciès paraît être liée à des mécanismes génétiques identiques. La diversité du cortège minéralogique par rapport à l'actuel est certainement due à des conditions climatiques, hydrologiques et environnementales favorisant la formation des minéraux argileux et à un stade peu avancé de dégradation de la MO. En opposition à nos résultats où les phénomènes de pédogenèse, et les contraintes naturelles et anthropiques entraînent la formation de la Kaolinite stade final de transformation des minéraux argileux.

Les minéraux moins évolués tels que la smectite, la vermiculite, la chlorite et les interstratifiés sont peu représentés et généralement présents en surface des profils. Ceci peut se justifier par le phénomène de pédogenèse naturelle dépendant fortement des processus physiques, chimiques et biologiques. L'altération chimique en milieu tropical fait évoluer ainsi ces minéraux argileux complexes et instables tels que les smectites, vermiculites, chlorites vers la kaolinite (Laignel, 1997).

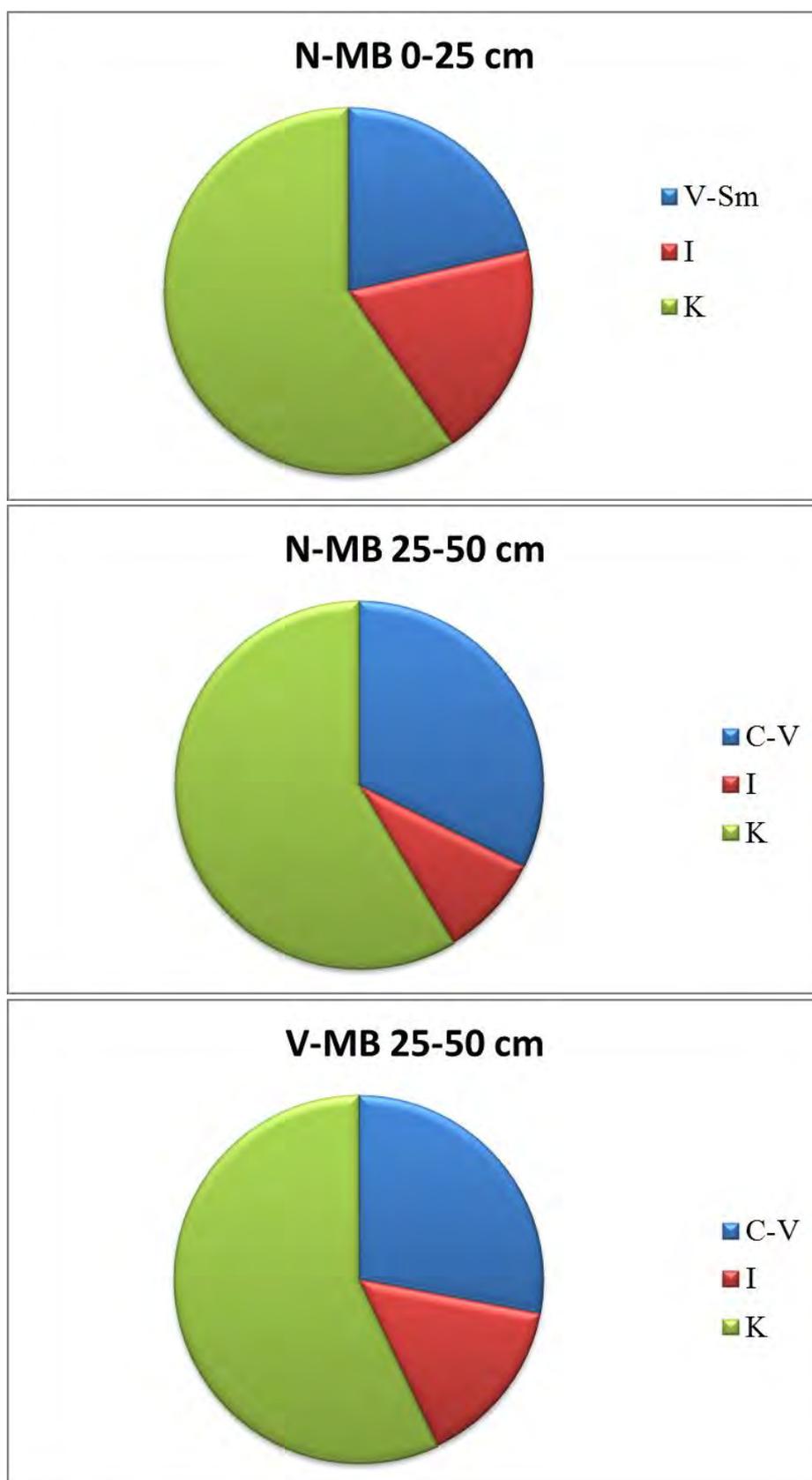


Figure 54 : Distribution de la semi-quantification de la minéralogie des argiles au niveau de la zone humide de Mboro au niveau du centre (N) et du versant (V)

X.3. Variabilité saisonnière de la teneur en eau dans le sol

Les sols des Niayes sont en général saturés en eau davantage dans la station centre que sur le versant. En saison sèche (juin 2011), la teneur en eau est plus importante dans les stations centres (N). Les sites LON (Lompoul) et MBN (Mboro) atteignent des valeurs maximales de 86 et 82 % avec un gradient croissant en fonction de la profondeur. A la station centre PON (Potou), le gradient est décroissant avec la profondeur avec en surface une teneur de 71%. Dans les stations versants (V), les valeurs sont très faibles à POV (Potou) de 0 % en surface à 22 % au niveau de la frange capillaire, et à (LOV) Lompoul, elles varient de 9 à 25 %. A MBV (Mboro), elle varie de 38 à 46 % avec un pic régressif de 12 % à 25 cm et un pic croissant de 73 % à 75 cm (Figure 55-(A-A')).

En mi-saison sèche (Février 2012), les profils de ZNS réalisés à un pas d'intervalle plus fin de 10 cm montrent une variabilité similaire dans la station centre des Niayes de Mboro (MBN) et Lompoul (LON) avec en moyenne des teneurs d'eau dans les sols de 69 et 71 % respectivement. Ils présentent des horizons plus humides qui se distinguent le long du profil ZNS avec des teneurs de plus 80% à partir de 90 cm de profondeur à LON. Sur les versants, les teneurs en eau sont modérées à LOV (de 44 à 16 %) et les plus fortes teneurs sont présentes à MBV dans une tranche de sol de 100 à 150 cm de profondeur atteignant plus de 68 %. Dans la station centre de Potou (PON), les teneurs en eau sont assez stables avec en moyenne 14 % et un pic de concentration de 39 % à - 45 cm. A POV, ces teneurs varient de 0,3 à 14 % de la surface à la frange capillaire (Figure 55-(B-B')).

En saison humide (Octobre 2012), nous avons choisi de ne représenter que les stations de Mboro et Lompoul qui contiennent les plus fortes teneurs en eau vu le type de sol très sableux à Potou. En effet, à Mboro, les teneurs en eau sont largement plus élevées qu'en saison sèche. Elles varient de 32, 50 et 11 % en surface ; et de 21, 22 et 14 % en profondeur au niveau de la zone capillaire des stations respectives de MB1, MB2 et MB3. A lompoul, les teneurs en eau augmentent continuellement avec la profondeur. Elles sont de 43, 48 et 60 % en surface et de 88, 90 et 90 % au niveau de la zone capillaire respectivement pour les stations LON1, LON2 et LON3 (Figure 56). Cette analyse montre une hétérogénéité du stock d'eau dans les sols à Mboro avec des pics de concentration le long des profils de ZNS dont le maximum atteint 87 % à 15 cm de profondeur. A Mboro, l'alternance des différents faciès sédimentologiques contribue à la rétention plus ou moins grande de l'eau en fonction de la profondeur. Le pic de concentration d'eau à -75 cm sur le versant de Mboro en saison sèche confirme le faciès très silteux et argileux à cette profondeur.

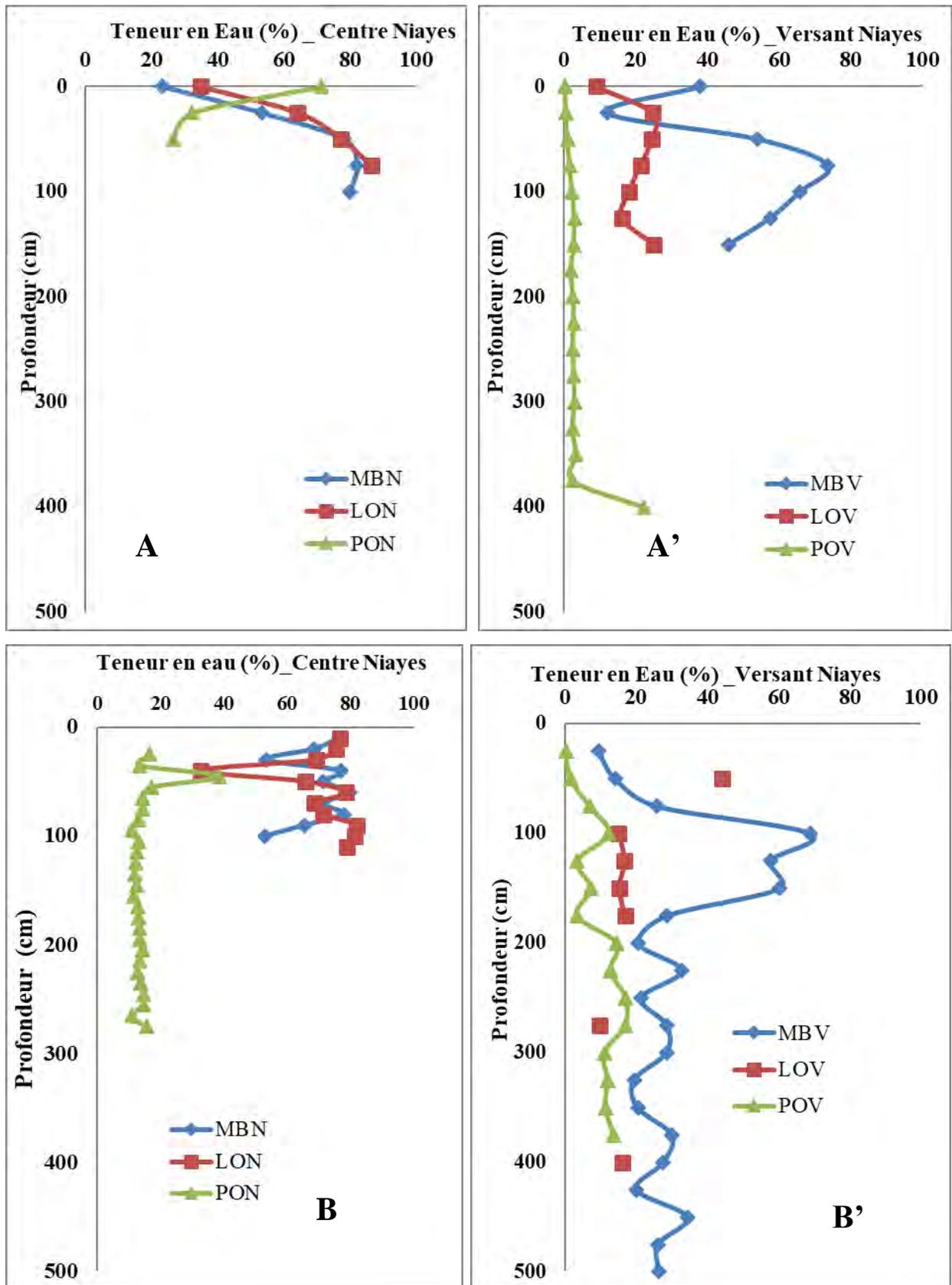


Figure 55 : Variabilité de la teneur en eau dans les profils de ZNS au cours des saisons sèches de Juin 2011 (A-A') et Février 2012 (B-B') dans le centre (N) et versant (V) des Niayas de Mboro, Lompoul et Potou

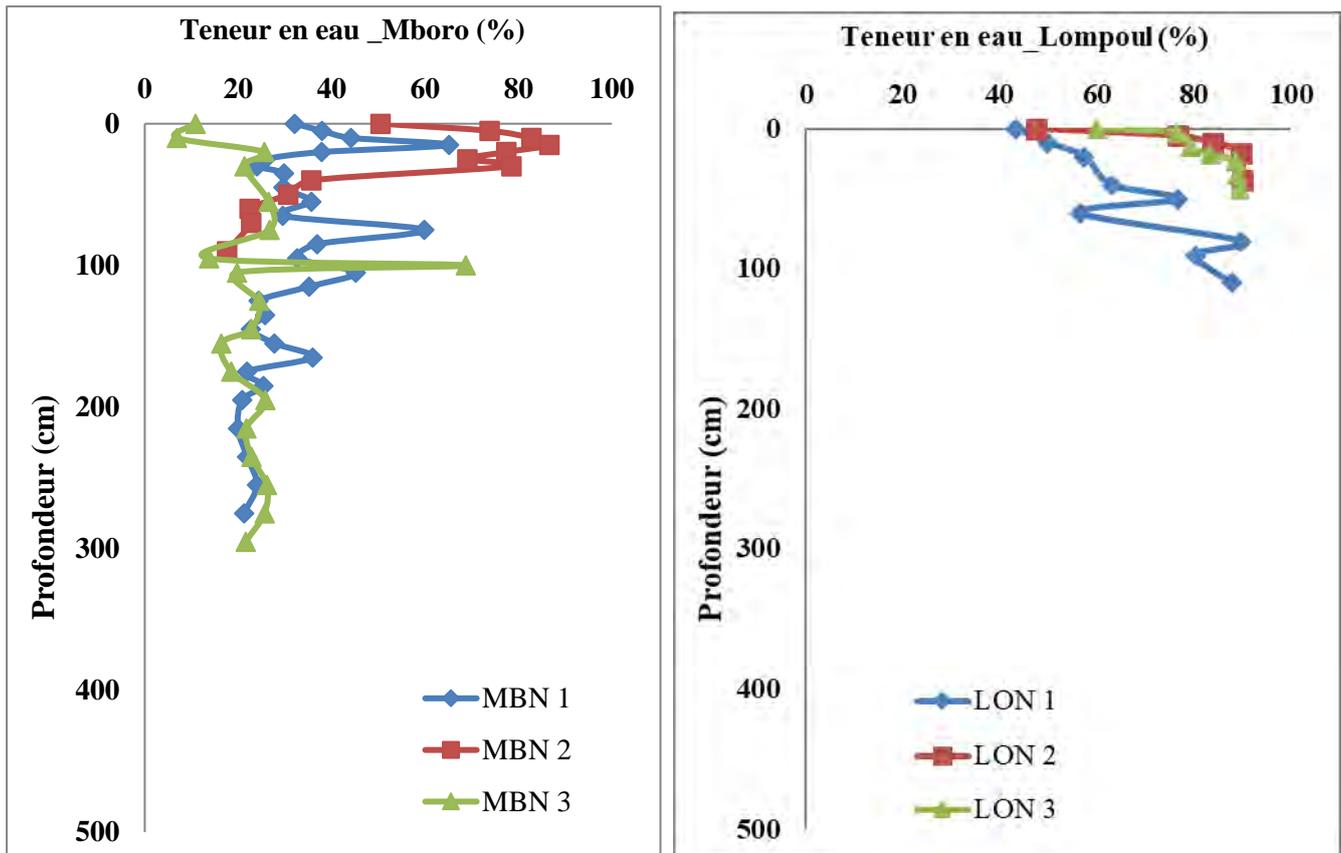


Figure 56 : Variabilité de la teneur en eau dans les profils de ZNS en saison humide d'Octobre 2012 au sein des Niayes de Mboro et Lompoul sur trois points d'échantillonnage distants de 1 m

Les teneurs en eau plus importantes en profondeur des profils de Lompoul peuvent se justifier par les sols très riches en tourbes qui emmagasinent un maximum d'eau.

Ainsi, les zones humides du Littoral Nord principalement dans les secteurs Sud et centre présentent une forte capacité de rétention d'eau par rapport à la zone Nord. Les sols de Mboro sont plus saturés en saison sèche en profondeur, ceux de Lompoul en saison humide avec des teneurs plus importantes en profondeur. Ceci peut se justifier par la lithologie des sols présentant des taux de particules fines plus importantes dans la partie Sud et centre des Niayes du Littoral Nord associé à la présence de tourbes qui ont une capacité de rétention d'eau supérieure à 80 % (Lezine, 1985, Fall, 1986, Magnan, 2013). Cette étude permet donc de confirmer qu'il existe bien une variabilité temporelle dans les trois sites pilotes par rapport aux périodes d'échantillonnage Juin, Février et Octobre. On distingue aussi bien un enrichissement en eau dans les sols différents en fonction de la position dans la dépression, de la profondeur des profils et des saisons principalement à Mboro et Lompoul.

X.4. Variabilité des paramètres physico-chimiques (Eh, pH, T°)

L'analyse de la Figure 57 présente l'ensemble des valeurs de potentiel d'oxydo-réduction (Figure 57 A-A'), de pH (Figure 57 B-B') et de température (Figure 57 C-C') en fonction de la profondeur dans les deux stations «centre» et «versant» de chacune des trois zones humides étudiées. Le potentiel d'oxydo-réduction varie entre 115 et -100 mV, 95 à -74 mV, -53 à 262 mV pour les stations centres et celles des versants de 387 à 310 mV, 95 à 187 mV, 377 à 343 mV respectivement à Mboro, Lompoul et Potou

La station centre de Mboro présente un milieu réducteur dans sa partie superficielle et en profondeur avec des valeurs négatives à -30 cm et -90 cm. A la station versant, le profil de potentiel-redox présente des valeurs positives, de l'ordre de 400 mV en surface puis de 200 mV en profondeur. Ce paramètre « redox » permet de mettre en évidence une variation spatiale des propriétés d'oxydo-réduction le long des profils de ZNS selon un transect « versant - centre » à l'échelle de la Niaye. Les sédiments sont acides avec des valeurs de pH de l'ordre de 6 à la station « centre » et de l'ordre de 4 à la station « versant » et cette acidité se maintient sur toute la tranche de sédiment investiguée quelque soit la station.

A la station centre de Lompoul, les valeurs positives de potentiel d'oxydo-réduction diminuent avec la profondeur pour atteindre des valeurs négatives en profondeur. A la station versant, les valeurs de potentiel d'oxydo-réduction sont positives. Le profil de pH, à la station centre montre une légère acidification des sédiments en surface puis les valeurs se stabilisent autour de 6. Par contre, les sédiments sont plus acides de l'ordre de 4 au niveau du versant.

La Niaye de Potou, présente des profils de potentiel d'oxydo-réduction quasi identiques pour les deux stations avec des valeurs positives sur toute la tranche de sédiments de l'ordre de 200 mV. Ce paramètre ne permet pas de mettre en évidence une variation spatiale physico-chimique à l'échelle de cette zone humide. De même les profils de pH présentent des valeurs oscillant en moyenne autour de 6 sur toute la tranche de sédiment.

Les valeurs de température sont relativement homogènes autour de 25°C selon les stations (centre et versant) des 3 zones humides étudiées.

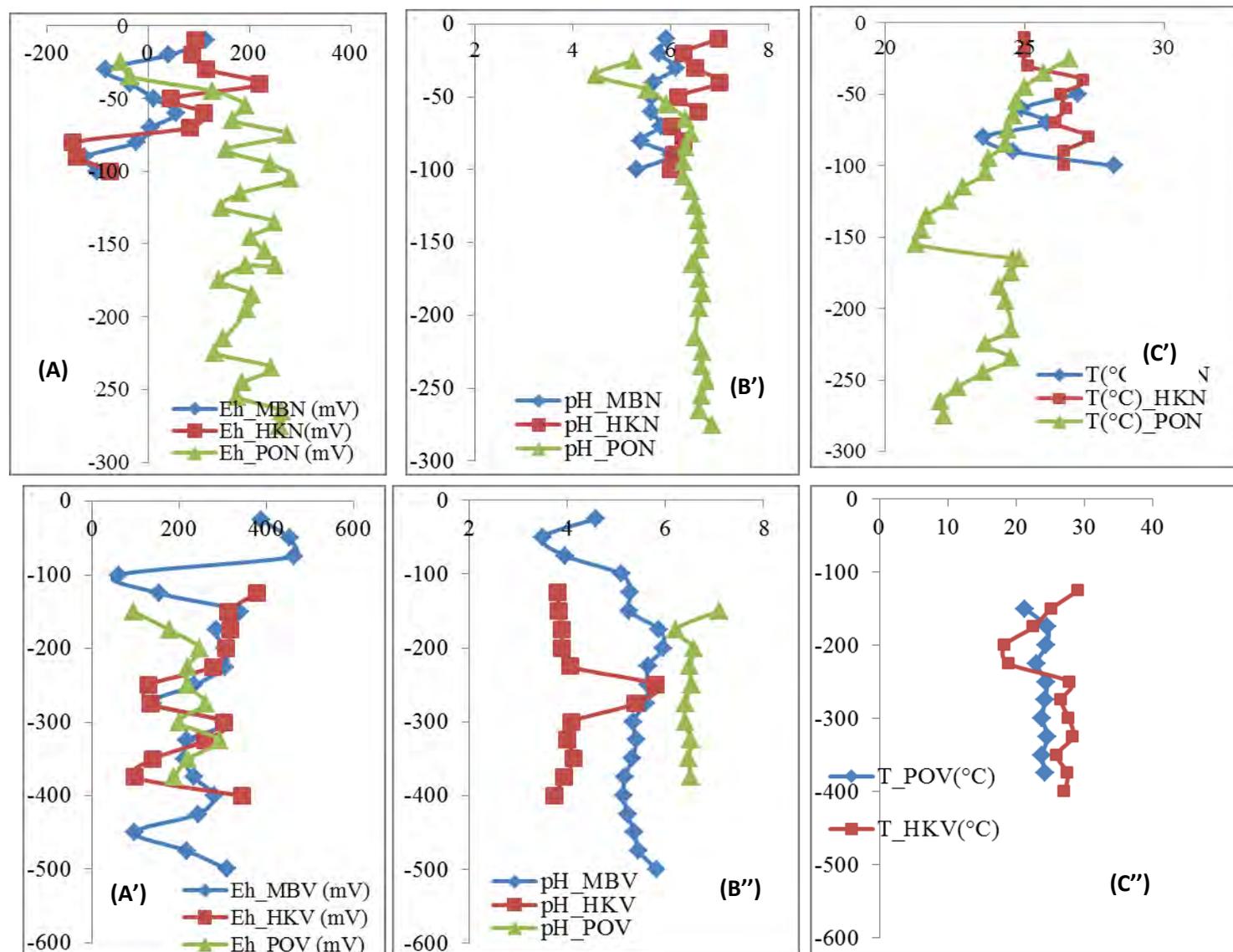


Figure 57 : Variation du Potentiel d'oxydo-réduction (A-A'), du pH (B-B') et de la température (C-C') dans les profils de ZNS au niveau du centre (N) et versants (V) des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou

Ainsi, cette analyse permet de conclure qu'il existe une variabilité spatiale des paramètres Redox et pH à l'échelle des sites pilotes et à l'échelle du Littoral Nord. En effet, le redox est un paramètre discriminant principalement dans les profils des stations centre alors que le pH l'est dans les stations versants des trois sites pilotes. Cependant, le paramètre température ne permet donc pas de déceler une variabilité spatiale ni à l'échelle d'une zone humide elle-même ni entre les trois zones humides étudiées.

X.5. Evaluation qualitative et quantitative de la matière organique dans la ZNS

L'évaluation de la quantité et de la qualité de la MO a été effectuée à l'aide des valeurs de valeurs de Carbone Organique Particulaire (COP), des indices géochimiques d'Hydrogène (IH), d'Oxygène (IO) et de température de craquage (Tmax et TpeakS2) obtenus par la Pyrolyse Rock Eval 6. Cette méthode a été initialement utilisée pour diagnostiquer les roches sources d'hydrocarbures pétrolières en mesurant les quantités de composés hydrocarbonés et oxygénés craqués lors de la pyrolyse cycle et en déterminant la température de fissuration maximale des hydrocarbures (Espitalié et *al.*, 1985 a, b; Lafargue et *al.*, 1998). En effet, les kérogènes sont des substances organiques naturelles exploités dans la production des Hydrocarbures comme le gaz et le pétrole. Ces kérogènes proviennent de la dégradation de la matière organique et des tourbes. Ce sont donc des composés intermédiaires issus de la transformation de dépôts de sédiments constitués de matières organiques en carburants fossiles. La technique de Pyrolyse Rock Eval a donc été par la suite adaptée pour évaluer la qualité biochimique de la matière organique et caractériser les composés organiques des sols et des sédiments récents (Lüniger and Schwark 2002, Sebag et al., 2006, Disnar et al., 2003, Disnar et Trichet 1984, Di-Giovanni et al., 1998, Siffedine et al. 1995).

Les travaux de Disnar et *al.* (2003) ont montré que les paramètres Rock-Eval peuvent révéler l'évolution chimique de la matière organique pendant le processus d'humification. Il a révélé que cette méthode fournit des informations essentielles sur la quantité et la composition de la matière organique des sols et que les compositions en IH et IO sont respectivement en relation avec les teneurs en H et O de la matière organique des sols. Cette méthode a permis de suivre l'évolution des processus d'humification en fonction de la profondeur croissante notifiant la disparition progressive des biopolymères hérités et la formation de substances humiques. Elle a permis de mettre en évidence les processus d'oxydation qui affecte habituellement la matière

organique dans les podzols et les processus de diagenèse précoce affectant la matière organique des sols minéraux. Ces processus débutent par une diminution de l'HI et se poursuivent par une augmentation de l'IO relative à une déshydrogénation suivie d'une oxydation.

L'étude de Sebag *et al.* (2006) a permis d'évaluer quantitativement et qualitativement la matière organique immature des sols. Ils précisent l'importance de la décomposition du pic du signal S2 des hydrocarbures dans l'évaluation des changements qualitatifs de la matière organique principalement sa thermolabilité et les processus d'humification croissante dans les tourbes. Ceci est principalement lié à l'abondance et au degré de conservation de la végétation primaire dans les sédiments. Cette nouvelle approche conduit donc à évaluer et à comparer indépendamment l'origine, la nature, l'âge, la quantité et la qualité de la MO.

Cette méthode fournit des informations fondamentales fiables sur la qualité et la quantité de la MO des roches et des sédiments à partir de la mesure des effluents carbonés de pyrolyse et d'oxydation. La signification et les unités de mesure de chaque paramètre ont été traitées dans la partie II. Les indices IO et IH issus de la pyrolyse Rock Eval s'adaptent bien à l'étude de la qualité de la matière organique (Delarue, 2010, Disnar *et al.*, 2003, Marchand *et al.* 2008, Sebag *et al.*, 2006, Copard *et al.*, 2006).

Les travaux de Delarue, (2010) ont montré que l'évolution de l'OI correspond en fait à une perte d'une MO riche en oxygène par dégradation microbienne. L'IH présente des valeurs assez élevées dans les végétaux terrestres peu dégradés riches en polysaccharides et lignine. Dans les sols minéraux, il enregistre une diminution lors des processus d'humification de la MO (Disnar *et al.* 2003). L'HI constitue un indicateur des processus d'humification de la tourbe (Delarue, 2010, Sebag *et al.*, 2006) dans des sols minéraux. La diminution de l'OI en profondeur, peut être associée à une diminution des polysaccharides consécutive aux processus d'humification et/ou de minéralisation de la MO. L'OI se corrèle à la cellulose des plantes.

La pyrolyse Rock-Eval est donc un outil puissant permettant de quantifier et caractériser rapidement la dynamique de dégradation de la matière organique.

X.5.1. Evaluation quantitative de la MO

L'analyse de la matière organique dans les sédiments des Niayes présentent des taux de Carbone Organique Particulaire (COP) variant entre 5 et 36 %, 10 à 34 %, 1 à 7 % avec en moyenne 18, 23 et 4 % dans les stations centres (MBN, LON, PON) respectives de Mboro, Lompoul et Potou. Dans les stations versants (MBV, LOV, POV), les teneurs en COP varient de 1 à 25 %, de 0 à

11 %, de 0,2 à 0 % avec en moyenne 9, 4 et 0 % respectivement à Mboro, Lompoul et Potou (Figure 58).

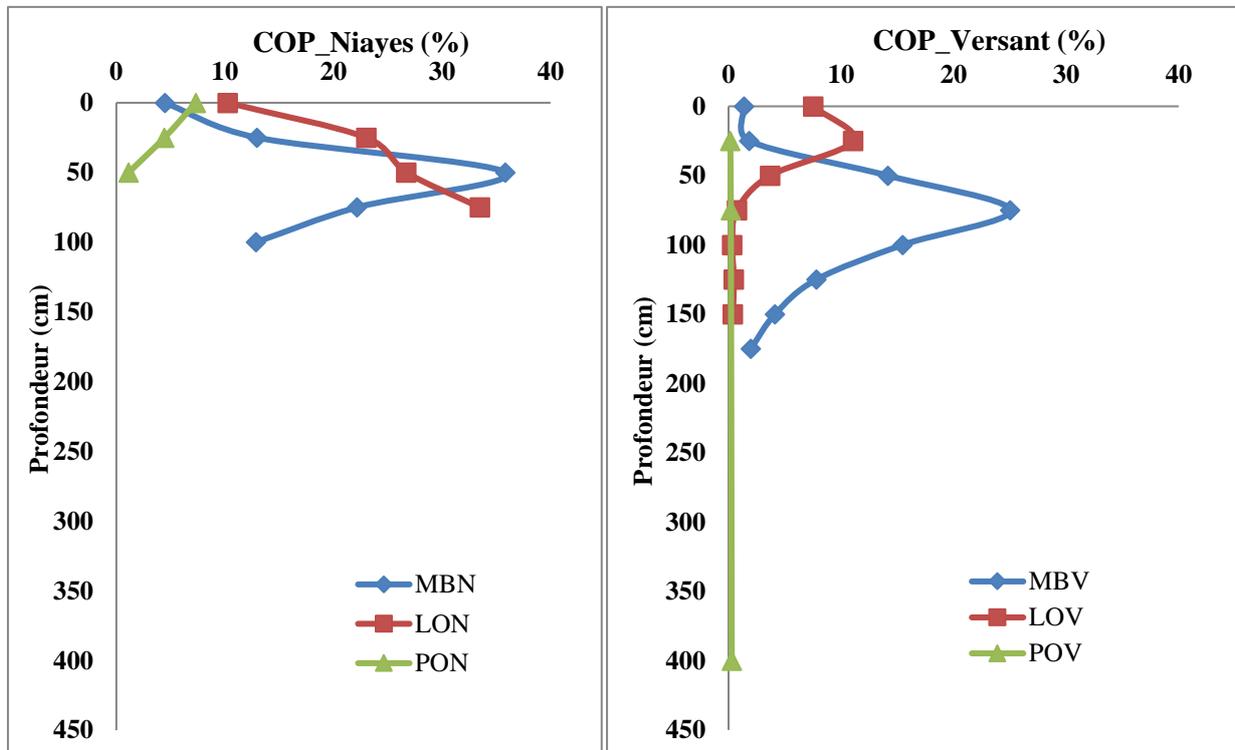


Figure 58 : Variation du Carbone Organique Particulaire (COP) en fonction de la profondeur dans les Centres (N) et sur les Versants (V) des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou (juin 2011)

Ce stock de carbone atteint un pic de concentration de 36 % à -50 cm à Mboro, s'accumule de façon croissante à Lompoul et décroît progressivement à Potou de la surface du sol à la frange capillaire dans les stations centres des Niayes. Dans les stations versants, les teneurs de carbone sont pratiquement nulles à Potou, des pics de concentrations de 25 % à -75 cm et 11 % à -25 cm se distinguent respectivement à Mboro et Lompoul.

Dans la Niaye de Mboro, à la station centre, les concentrations en COP sont de l'ordre de 5 % en surface, augmentent progressivement jusqu'à 36 % à -50 cm puis décroissent en profondeur. Ce pic de concentration est aussi perceptible à la station versant à la profondeur de -75 cm pour un taux plus faible de 25 % de COP.

La Niaye de Lompoul enregistre une augmentation du taux de COP avec la profondeur dans le centre de la Niaye. Sur le versant, les taux de carbone ne dépassent pas 11 % jusqu'à 25 cm de profondeur puis diminuent avec la profondeur pour atteindre 0,4 % au niveau de la frange capillaire.

La Niaye de Potou présente de très faibles concentrations en COP inférieures à 10 % à la station centre en surface et atteignant à peine 0,3 % à la station versant sans variabilité notable le long de la ZNS.

Cette analyse permet de mettre en évidence une variabilité spatiale du taux de COP à l'échelle des sites pilotes et à l'échelle du Littoral Nord validant ainsi l'hypothèse scientifique précédemment posée (cf Partie IV, p. 1).

X.5.2. Evaluation qualitative de la MO

L'évaluation qualitative de la matière organique a été réalisée grâce au graphique IH Vs IO de Van-Krevelen (Espitalié et *al.*, 1985, Lafargue et *al.*, 1998) initialement utilisé pour les roches à potentiel pétrolifère réadapté pour les composés organiques et sédiments récents. Ce diagramme permet de caractériser initialement l'origine (lacustre, marine et terrestre) des huiles ou des gaz issus des roches mères. Les valeurs de IH sont approximatives du ratio H/C de la MO, tandis que les valeurs de OI représentent le ratio O/C (Espitalié et *al.*, 1985). Ces deux paramètres conduisent donc à déterminer l'origine de la matière organique (Peters, 1986). Des valeurs d'IH supérieures à 600 mg HC / g COT correspondent à des sédiments lacustres enrichis en hydrocarbures. Les taux entre 300 et 600 mg HC / g COT correspondent à du matériel organique d'origine algale tel que le phytoplancton. Des valeurs inférieures à 300 mg HC / g COT correspondent à des dépôts pauvres en hydrocarbures, dérivés des plantes supérieures par exemple (Espitalié et *al.* 1985).

Trois ensembles de points se distinguent sur la Figure 59 en fonction de leurs teneurs en IH et IO autant dans la station centre (N) que sur le versant (V). Ces points correspondent aux sédiments des trois sites pilotes de Mboro, Lompoul et Potou à différentes profondeurs notées de 1 à 5 pour des tranches de sédiments de 25 cm entre la surface et 125 cm de profondeur.

La zone humide de Mboro présente dans sa station centre une Matière Organique (MO) riche en hydrocarbures avec un Indice Hydrogène (IH) variant de 272 à 452 mg IH/ g COT et un Indice Oxygène (IO) de 114 à 146 mg IO /g COT. Le centre de la Niaye de Lompoul montre une MO plus oxydée qu'à Mboro avec un IH entre 163 et 274 mg IH/ g COT et un IO 183 et 234 mg IO /g COT. La station centre de Potou enregistre les plus faibles valeurs avec un IH entre 139 et 181 mg IH/ g COT et un IO entre 127 et 166 mg IO /g COT mettant en évidence une MO faiblement hydrogénée et oxydée et dont les teneurs diminuent avec la profondeur. Il apparaît ainsi une différence entre les trois stations centre des Niayes ainsi que leur variation en fonction de la profondeur. L'indice IH supérieur à 300 mg HC/g COT montre une signature

**PARTIE IV : FONCTIONNEMENT HYDRO-GEOCHIMIQUE ET SEDIMENTAIRE DE
L'ECOSYSTEME DES NIAYES SUR LE LITTORAL NORD**

de la matière organique particulaire d'origine algale (phytoplancton) pour la station de Mboro qui n'apparaît pas dans les sédiments des deux autres stations de Lompoul et Potou.

Dans les stations versants, la qualité de la MO est plus spécifique en fonction des échantillons de sol le long de la ZNS situés en profondeur ou en surface avec trois grands groupes (Figure 59). Deux sous-familles pour les sites de Mboro et Lompoul dont une avec $213 < \text{IH} < 302 \text{ mg IH/ g COT}$ plus oxydée pour les couches de surface (0-100 cm) et moins en profondeur ($> 150 \text{ cm}$). La 2^{ème} sous-famille présente un $\text{IH} > 400 \text{ mg IH/ g COT}$ avec particulièrement les tranches de sol très silteuses de 25-75 cm et 50-75 cm respectivement à Mboro et Lompoul.

A Potou, seules deux tranches de sol (0-25 et 25-50 cm) ont pu être analysées compte tenu de la faible teneur en MO le long du profil de ZNS. Elles présentent des IH inférieurs à 200 mg IH/ g COT et des IO entre 30 et 87 mg IO/ g COT .

Il existe donc bien une variabilité spatiale de la qualité de la MO au sein de chaque Niaye avec une différenciation plus marquée dans la station centre que celle du versant (cf Partie IV, p.1). Par ailleurs, la température maximale à laquelle est soumise les sédiments contribue à déterminer la maturité des sédiments. En effet, la Figure 60 présente l'évolution du pic de température pour la détermination des composés hydrocarbonés issus de la dégradation des substances organiques représenté par le signal S2.

PARTIE IV : FONCTIONNEMENT HYDRO-GEOCHIMIQUE ET SEDIMENTAIRE DE
L'ECOSYSTEME DES NAIYES SUR LE LITTORAL NORD

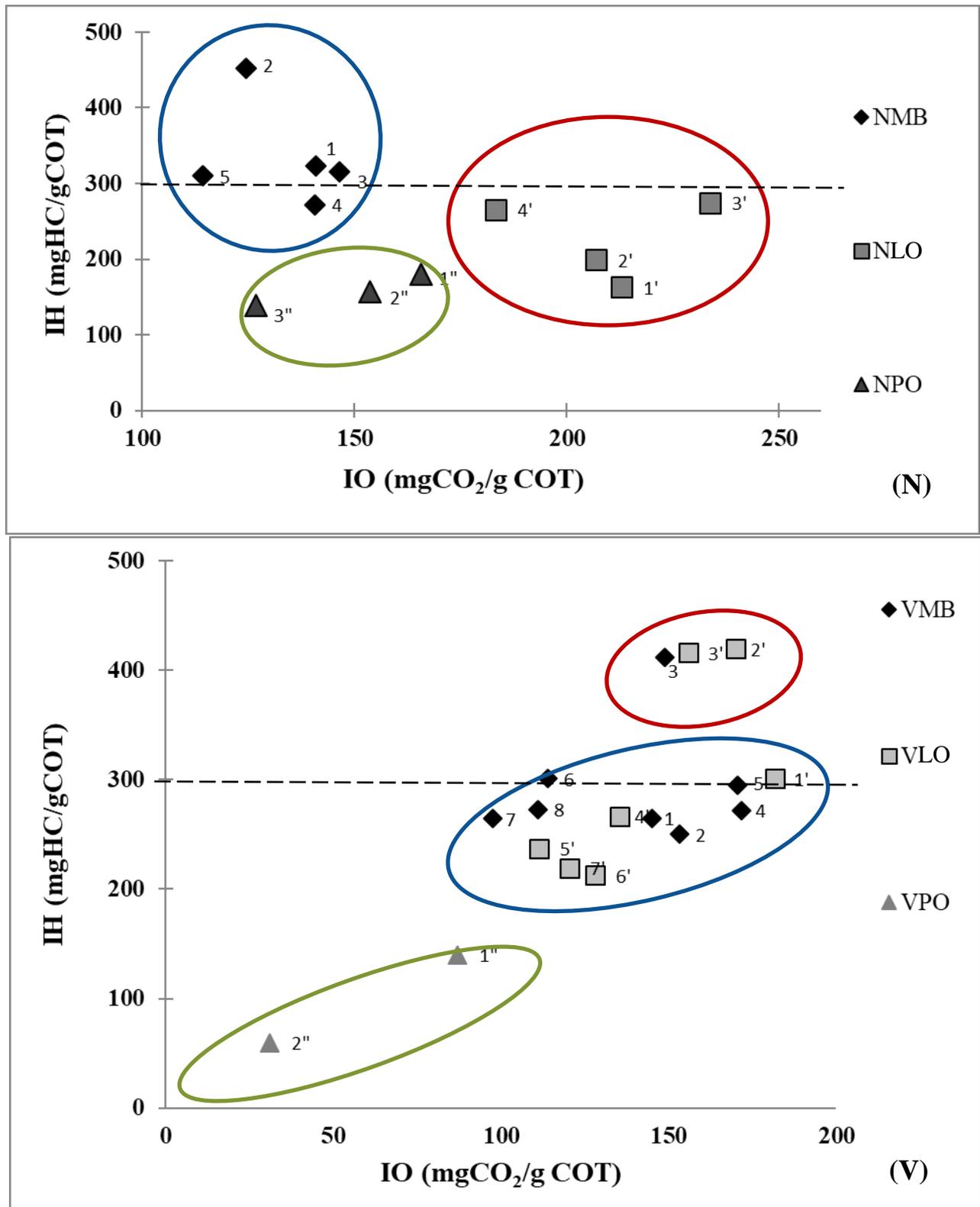


Figure 59 : Diagramme de Van-Krevelen dans les stations centres (N) et versants

(V) des Niayes de Mboro (MB), Lompoul (LO) et Potou (PO) (juin 2011)

NB : Les chiffres représentent les profondeurs à intervalle de 25 cm le long du profil ZNS
(ex : 1 : 0-25 cm, 4 : 75-100 cm)

PARTIE IV : FONCTIONNEMENT HYDRO-GEOCHIMIQUE ET SEDIMENTAIRE DE
L'ECOSYSTEME DES NAIYES SUR LE LITTORAL NORD

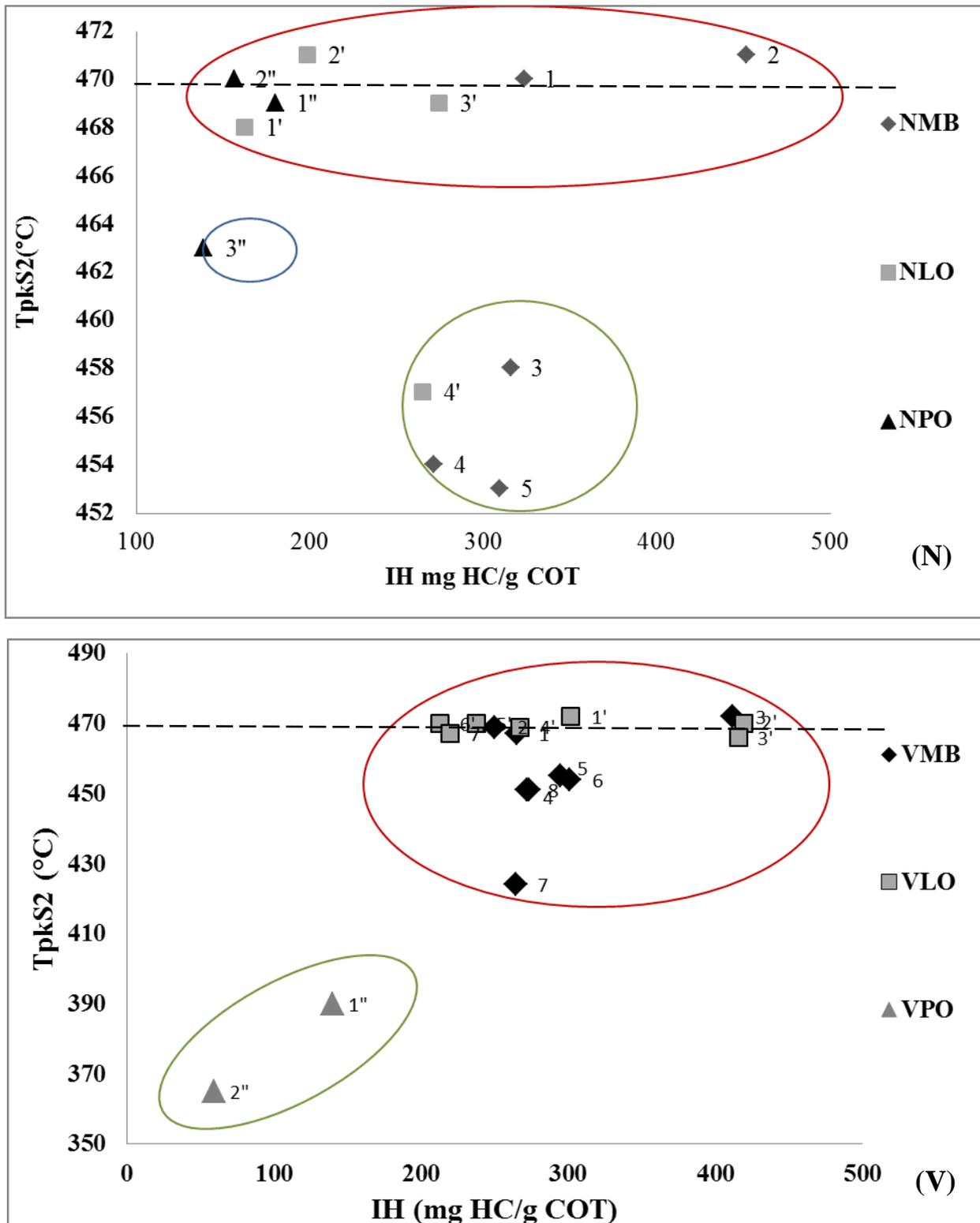


Figure 60 : Diagramme binaire IH Vs TpeakS2 centres (N) et versants (V) des Niayes de Mboro (MB), Lompoul (LO) et Potou (PO) (juin 2011)

NB : Les chiffres représentent les profondeurs à intervalle de 25 cm le long du profil ZNS (ex : 1 : 0-25 cm, 4 : 75-100 cm)

Ces températures varient de 453 à 471°C, 457 à 471°C et 463 à 470°C dans les stations centres et sur les versants de 424 à 472°C, 466 à 472°C et 365 à 461°C respectivement à Mboro, Lompoul et Potou (Figure 60). Le paramètre température du pic de signal S2 (TpeakS2) détermine ainsi l'origine et la résistance thermique des constituants organiques. Il permet de distinguer donc deux principales fractions organiques :

- Une fraction immature thermique (Tpeak < 470°C)
- Une fraction réfractaire (Tpeak > 470°C)

Ces deux fractions réagissent différemment durant la période des transformations pédogénétiques. Ainsi, les sédiments des Niayes du Littoral Nord dans leur station centre montrent une MO immature en profondeur et mature en surface. Sur les versants, la MO est mature le long du profil ZNS de Lompoul et dans les premiers 75 cm à Mboro. Au Nord, à Potou, la MO est généralement immature en surface. Ceci confirme que la MO est de meilleure qualité dans la partie centre du Littoral Nord à Lompoul sur généralement l'ensemble des profils ZNS (versant et centre). A Mboro, la MO est plus mature dans les parties supérieures qu'en profondeur. A Potou, la MO est généralement immature. Il existe donc bien une variabilité spatiale de la maturité de la MO au sein d'une même Niaye en fonction de la profondeur, plus accentuée dans les stations centres que versants et à l'échelle du Littoral Nord avec une MO plus mature dans la zone centre que les zones Nord et Sud. La mise en relation des paramètres quantitatifs et qualitatifs de la MO permettra de discuter les processus géochimiques qui affectent chacune de ces Niayes et l'origine de leur MO.

X.6. Processus géochimiques et origine de la matière organique des Niayes

L'analyse de la variation de l'IH en fonction du COP permet de mettre en relation la quantité par rapport à la qualité de la matière organique particulaire et de discuter de son origine. En effet, la figure 61 met en évidence pour les stations centres (N) trois groupes de points : (i) un 1^{er} groupe des sédiments de Mboro, (ii) un 2^{ème} groupe représentés par ceux de Lompoul et (iii) un 3^{ème} groupe représentés par les sédiments de Potou. Dans ces stations, le groupe 1 présente les valeurs les plus importantes en IH et COP variant en fonction de la profondeur. Le groupe 2 des valeurs de IH et IO augmentent de la surface du sol à la zone capillaire alors pour le groupe 3 elles diminuent avec la profondeur. De plus, les taux de matière organique particulaire sont plus importants à Mboro et Lompoul atteignant des pics de 36 et 34 % correspondant à des

IH respectifs de 316 et 265 aux profondeurs respectives de 50-75 et 75-100 cm. Cependant, les maximas de IH (452 et 275) se localisent aux profondeurs 25-50 et 50-75 cm au-dessus des précédentes dans les Niayes respectives de Mboro et Lompoul.

Dans les stations versants (V), trois groupes se distinguent mais de façon plus hétérogène, ils regroupent : (i) un 1^{er} groupe des sédiments de Mboro des tranches de sol de 50-75 cm à 100-125 cm, (ii) un 2^{ème} groupe des sédiments de Lompoul des tranches de sol de 0-25 cm à 50-75cm et la tranche de sol de 125-150 cm de Mboro, (iii) un 3^{ème} groupe avec les sédiments de Mboro de 0 à 50 cm et de 150 à 200 cm, ceux de Lompoul de 75 à 175 cm et ceux de Potou de 0 à 50 cm (Figure 61). Le 1^{er} groupe est caractérisé par des fortes valeurs en COP avec un pic 25 %. Le 2^{ème} groupe est composé de sédiments présentant des valeurs importantes de IH avec particulièrement la tranche de sol de 25-50 cm à Lompoul ayant un pic IH de 420 correspond à 11% de COP. Dans le 3^{ème} groupe, le COP et l'IH sont faibles et décroissent en profondeur principalement à Lompoul et Mboro. A Potou versant ces valeurs sont quasi-inexistantes (Figure 61).

Ainsi, les groupes des stations centres se différencient en fonction de chaque zone humide et des processus géochimiques qui la caractérisent. Par contre, les stations versants se distinguent en fonction de la profondeur avec les parties supérieures des profils riches en COP et IH, et les parties inférieures présentant des teneurs plus faibles. La différence des pics de concentration COP et IH montre que la quantité de la MO ne se corrèle pas directement avec une meilleure qualité de celle-ci.

La Niaye de Mboro présente donc autant dans la station centre que celle du versant des pics de concentration en COP et en IH. Ces pics peuvent s'expliquer par une première phase d'accumulation et une seconde phase de dissolution et relargage du carbone et/ou de faible présence en profondeur. La première phase de croissance peut se justifier par la diagenèse d'enfouissement. La deuxième phase de décroissance peut être favorisée par la minéralisation de la matière organique ou correspondre à une phase sédimentaire plus importante que la phase organique. Cependant, ces processus sont plus marqués dans la station centre que celle du versant.

La Niaye de Lompoul centre met en évidence un processus continu d'accumulation de MO riche en hydrocarbures de la surface du sol à la frange capillaire. Ceci peut se justifier par la présence de tourbes principalement en profondeur. A ceci peut s'ajouter le processus de diagenèse d'enfouissement. Dans sa station versant, la phase d'accumulation est suivie d'une

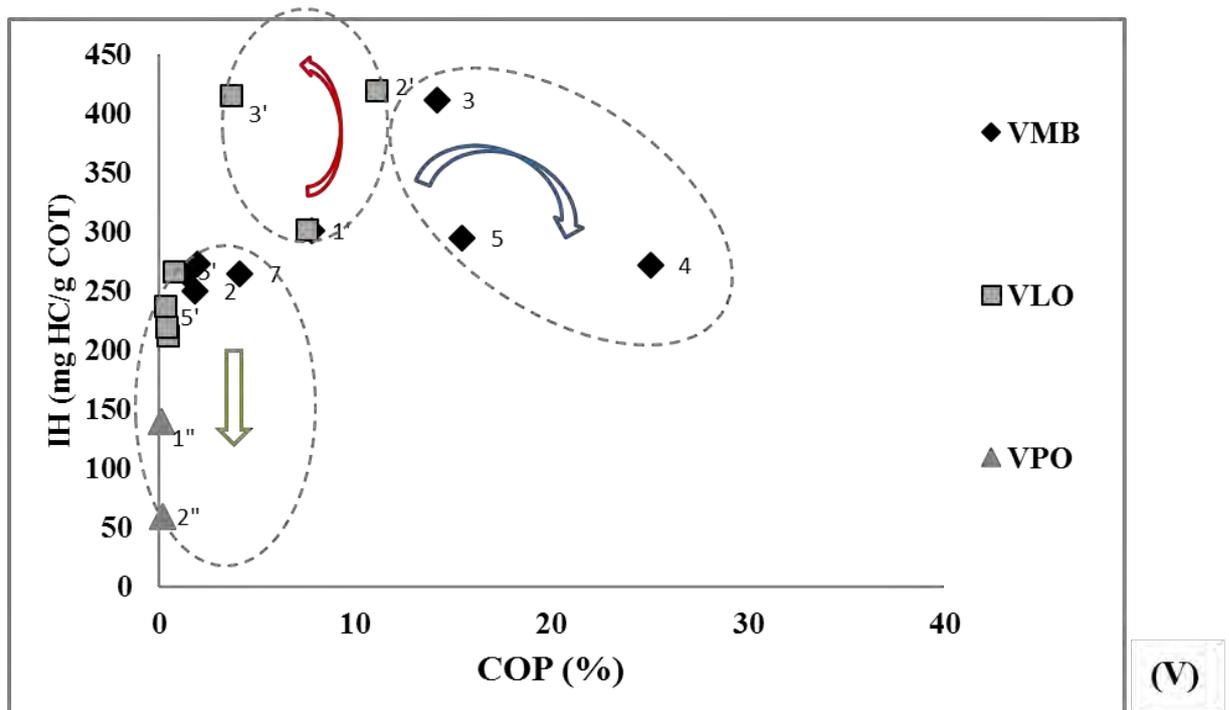
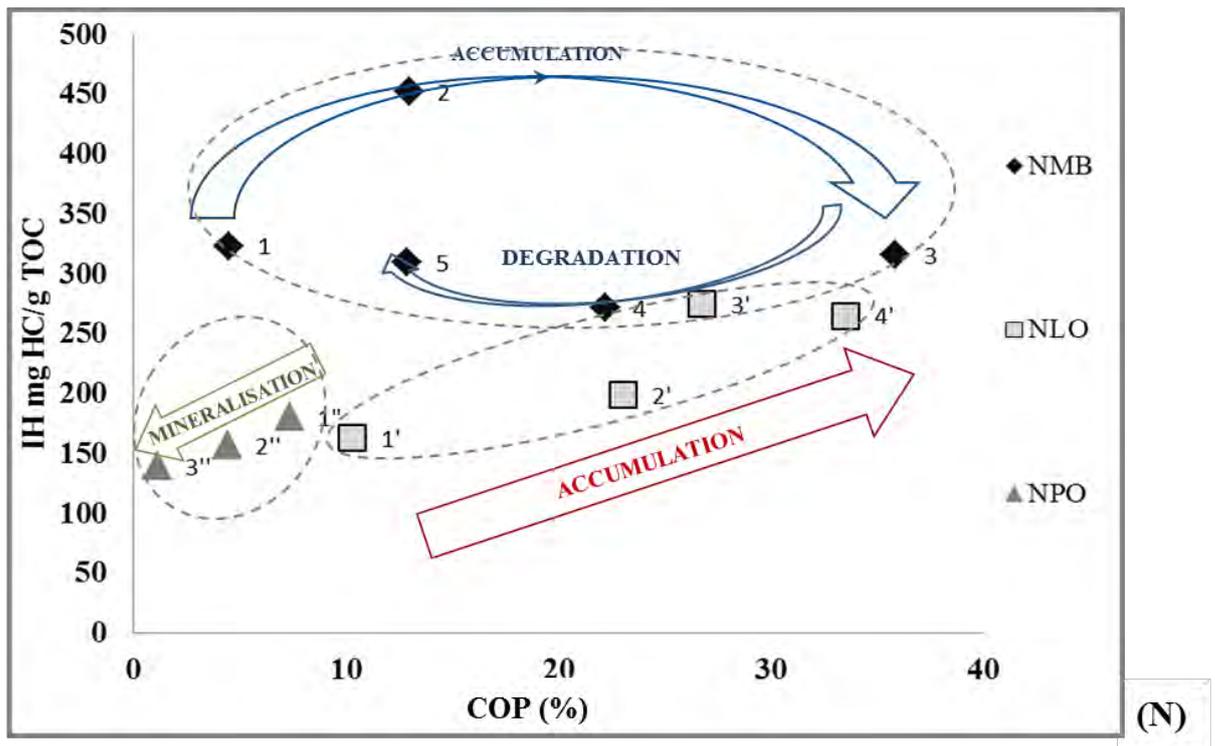


Figure 61 : Diagramme binaire COP Vs IH dans le centre des Niayes (N) et sur les Versants (V) (juin 2011)

NB : Les chiffres représentent les profondeurs à intervalle de 25 cm le long du profil ZNS (ex : 1 : 0-25 cm, 4 : 75-100 cm)

phase de diminution de la MO comme dans la Niaye de Mboro mais avec des taux de COP plus faibles et des IH plus importants.

La zone humide de Potou au Nord présente les taux les plus faibles en COP et IH. Ces teneurs diminuent avec la profondeur dans la station centre de la Niaye et peuvent témoigner des processus de minéralisation de la matière organique.

L'indice IH renseigne sur la qualité de la MO et sur l'origine de la MO. Elle dépend à la fois de l'origine biologique (terrestre et/ou marine) et de l'état de dégradation de la MO particulière (Espitalié et *al.*, 1985). D'après le diagramme de Van Krevelen, avec un IH compris entre 150 et 600 mg HC/g COT, les sédiments organiques des sites pilotes de Mboro, Lompoul et Potou présentent une MO de type II d'origine algale. On peut donc généraliser cette origine à l'ensemble des zones humides du Littoral Nord au Sénégal. Cependant, sur le versant de Potou, on rencontre des IH est inférieur à 150 mg HC/g COT peut impliquer une origine terrestre. De plus, la particularité « ligno-cellulosique » de la MO présente un faible IH (< 250 mg HC/g TOC) associé à un fort OI (>100 mg O₂/g TOC) (Marchand et *al.*, 2008) provenant de la production locale des racines (Twiley et *al.*, 1992, Otero, 2006). Ce cas typique se rencontre dans le centre de la Niaye de Potou et dans la partie supérieure du centre de la Niaye de Lompoul de 0 à -50 cm. Sur les versants, cette MO ligno-cellulosique se rencontre particulièrement à Lompoul dans toute la partie en profondeur de -100 à -200 cm. Ainsi, la partie supérieure du profil ZNS versant de Lompoul et l'ensemble du profil ZNS centre de la Niaye en général de Mboro peuvent témoigner d'une origine de la MO à la fois autochtone provenant de la biodiversité de l'écosystème et allochtone issue du transport des particules fines dans la dépression

La MO d'origine autochtone peut être issue des débris de végétaux et la litière de ces zones humides agricoles. La MO allochtone quant à elle peut provenir de la végétation des écosystèmes dunaires, du transport lacustre des sols érodés, du phytoplancton (Goni et *al.*, 2006, Mesnage et *al.* 2007, Kristensen et *al.*, 2008, Ranjan et *al.*, 2011, Jang et *al.*, 2012). Elle peut aussi provenir des rejets industriels, agricoles et domestiques apportés par les eaux de ruissellement. De plus, le transport des particules en suspension provenant du drainage des eaux peut apporter de la MO comme observé dans une rivière au Kenya (Bouillon et *al.*, 2007).

Toutefois, le couvert végétal en fonction du type d'espèces et de la biomasse peut induire une différence dans les proportions de MO produites. Il peut se distinguer donc en fonction du type de végétation deux sources majeures de MO dans les zones humides littorales agricoles : les

plantes herbacées riches en particules moins résistantes « bio-macromolécules » et les arbres-arbustes riches en particules plus résistantes ligno-cellulosiques. De plus, ces zones humides sont soumises à des processus d'humification et de minéralisation qui vont influencer le type de MO accumulée (Disnar *et al.*, 2003). Aussi, la présence de litière peut déterminer les couches humiques dans les profils de sols. Ceci peut être dû à une bonne préservation des « bio-macromolécules » résistantes dans la litière et leur transformation en horizons humiques comme c'est le cas à Mboro. A ceci, s'ajoute des facteurs locaux tels que le type de sol, la préservation ou la dégradation sélective des constituants organiques et de l'interaction avec la matrice minérale du milieu.

De plus, la décroissance de la teneur en COP peut être aussi causée par la consommation de la MO par la communauté microbienne à travers le processus de diagenèse (Mesnage *et al.*, 2007). Ceci peut être mis en évidence par la disponibilité des nutriments impliquant une oxydation importante de la MO avec pour conséquence une augmentation de Carbone Organique Dissous (COD) résultant de la dégradation de la MO (Cf Chap. XI-1). Toutefois, les forts taux de MO peuvent être aussi attribués aux microorganismes hétérotrophes développés dans la partie supérieure des eaux et surtout dépendant de la production primaire (principalement les diatomées et cyanobactéries). Ces éléments suggèrent une production organique autochtone issue du phytoplancton et/ou matériel bactérien (Moers *et al.*, 1990) comme c'est le cas dans l'écosystème à vocation agricole des Niayes.

Cependant, d'autres types d'écosystèmes comme les lagunes côtières présentent des taux de COP plus faibles variant de 4 à 7 % dans la lagune de Thau en France (Mesnage *et al.*, 2007), de 0 à 4 % dans la mangrove de la Somone au Sénégal (Sakho *et al.*, 2015) ainsi que les mangroves tropicales (Kristensen *et al.*, 2008). Les travaux de Marchand *et al.* (2003), Lallier-Vergès *et al.* (1998) montrent que dans les mangroves matures les taux de COP peuvent atteindre 15 %. Le fort couvert végétal et les pratiques horticoles contribuent donc à augmenter les stocks de carbone dans ces zones humides du littoral du Sénégal.

Ainsi, la MO dans les Niayes du Littoral est principalement d'origine algale provenant de la production primaire de ces écosystèmes. La Niaye de Mboro présente en profondeur une bonne conservation des horizons humiques. Les Niayes de Lompoul et Potou enregistrent une contribution de la MO ligno-cellulosique issue de la production locale des racines (Marchand *et al.*, 2008)

Les processus géochimiques de formation, d'accumulation, de maturité et dégradation de la MO sont différents en fonction de la Niaye concernée dans les stations centre et en fonction de

la profondeur sur les versants. La Niaye de Mboro présente une phase d'accumulation en surface suivie d'une phase de relargage de la MO associée à des phases sédimentaires plus ou moins importantes en profondeur. Ceci se corrèle bien avec la particularité de ses faciès sédimentaires démontrés précédemment. La Niaye de Lompoul présente un processus continu d'accumulation de la MO associé à la diagenèse d'enfouissement qui met bien en évidence les fortes teneurs en eau de plus de 80 % particulièrement en profondeur dans la station centre. La Niaye de Potou est caractérisée par les processus de minéralisation de la MO que nous tenterons discuter en étudiant la chimie des eaux interstitielles avec particulièrement le Carbone Organique Dissous.

Conclusion du chapitre X

Ce chapitre a montré la particularité de la zone humide Mboro qui présente un matériel fin plus important que dans les zones humides de Lompoul et Potou. En effet, Mboro présente des types de sols généralement silteux à silto-sableux avec un cortège de minéraux argileux plus diversifié qu'au niveau des deux autres sites. Ce dernier présente ainsi majoritairement de la Kaolinite associée généralement à de l'illite et des interstratifiés principalement en surface.

Les teneurs en eau sont plus importantes à Mboro et Lompoul avec des taux atteignant 80 % notifiant d'une forte capacité de rétention d'eau dans les sols par rapport à Potou. Ces teneurs sont plus importantes dans les stations centre que les versants davantage en profondeur qu'en surface et varient en fonction des saisons.

L'analyse des paramètres physico-chimiques a montré que le potentiel d'oxydo-réduction et le pH sont des paramètres discriminants dans les Niayes alors que la température présente des faibles variations. Ces zones humides présentent un pH généralement acide le long de la ZNS de l'ensemble des profils. Le milieu est généralement réducteur dans les parties supérieures et en profondeur au niveau de la frange capillaire principalement dans les stations centre de Mboro et Lompoul alors que dans les stations versants, le milieu est oxydant.

La distribution spatiale du Carbone Organique Particulaire (COP) est hétérogène sur l'ensemble du Littoral Nord et spécifique à chaque zone humide étudiée. Ce COP a une concentration plus élevée à Mboro et à Lompoul par rapport à Potou. Elle est en moyenne de 18, 23 et 4 % dans les stations centres, et de 9, 4 et 0 % dans les stations versants des Niayes respectives de Mboro, Lompoul et Potou.

**PARTIE IV : FONCTIONNEMENT HYDRO-GEOCHIMIQUE ET SEDIMENTAIRE DE
L'ECOSYSTEME DES NIAYES SUR LE LITTORAL NORD**

Par ailleurs, les paramètres géochimiques IH, IO, TpeakS2 ont contribué à déterminer la qualité et l'origine de la MO. En effet, la MO est principalement d'origine algale issue généralement de la production primaire du milieu. Cette MO est biodégradable riche en substances hydrocarbonées à Mboro, elle est oxydée et évoluée à Lompoul alors qu'elle est minéralisée à Potou. Ces teneurs particulièrement élevées dans les Niayes de Mboro et Lompoul peuvent s'expliquer par la présence de tourbes plus ou moins dégradées. De plus, cette MO est mature dans les parties supérieures des profils ZNS et immatures en profondeur dans les stations centre de l'ensemble des Niayes. Cependant, dans les stations versants, cette MO est plus mature dans les 75 premiers centimètres des profils de ZNS par rapport à celle en profondeur à Mboro, à Lompoul elle est mature sur l'ensemble du profil ZNS et immature à Potou. Ceci met bien en évidence la variabilité spatiale de la maturité de la MO au sein d'une même Niaye en fonction de la profondeur, plus accentuée dans les stations centre que les versants.

Ce chapitre a donc permis de présenter les caractéristiques granulométriques, minéralogiques, physico-chimiques et géochimiques des sédiments de trois zones humides réparties sur le littoral Nord. Il apparaît au regard des résultats, une variation spatio-temporelle des caractéristiques de ses zones humides aussi bien à l'échelle locale de chaque Niaye que régionale le long du littoral Nord. Cet écosystème est généralement composé de sédiments avec des teneurs en eau plus ou moins importantes en fonction du site et de la profondeur le long de la ZNS, il serait nécessaire de coupler à cette étude des sédiments à celle de la chimie de l'eau du sol.

Chapitre XI : Chimie et Géochimie Isotopique des eaux interstitielles de la zone des Niayes

Les eaux interstitielles sont les eaux contenues dans les cavités et interstices d'un milieu poreux. Elles jouent un rôle majeur dans les sédiments le long de la zone non saturée. La répartition de ces eaux dans l'espace poreux, les interactions avec les roches et minéraux du sol, la concentration des sels dissous et les phénomènes de capillarité influencent leurs mouvements dans le sol ainsi que la chimie et la géochimie de l'eau qui recharge de la nappe.

Il est donc important de pouvoir déterminer la qualité de l'eau qui s'infiltré et alimente la nappe après reprise évaporatoire en suivant la migration et l'évolution des substances organiques et minérales qui peuvent être à l'origine de la pollution des eaux souterraines.

Nous allons pour cela étudier la variabilité spatiale et temporelle de la chimie des interstitielles en mettant l'accent sur les ions majeurs, le Carbone Organique Dissous et les sels nutritifs ; puis établir les relations entre la chimie des eaux interstitielles et la nappe, déterminer les processus géochimiques et isotopiques de transfert des eaux le long de la ZNS des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou ainsi que la variabilité saisonnière de la qualité de ces eaux.

XI.1. Variabilité de la chimie des eaux interstitielles

XI.1.1. Ions majeurs

L'analyse des eaux interstitielles au niveau des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou au cours des trois campagnes de fin saison sèche (Juin 2011), mi-saison sèche (Février 2012) et de saison humide (Octobre 2012) a montré des particularités pour chacun des trois sites pilotes (Figures 62-64, Annexe VIII).

En Juin 2011, les eaux interstitielles les plus minéralisées se localisent à Lompoul le long de la ZNS dans les stations centre et versant de la Niaye. Les taux de chlorures atteignent 7 772 et 9 390 mg/l en surface respectivement au centre et sur le versant de la Niaye de Lompoul (Figure 62). A Potou, elles sont très minéralisées particulièrement au centre de la Niaye mais moins qu'à Lompoul. Les eaux interstitielles les moins minéralisées sont rencontrées à Mboro autant dans la Niaye que sur le versant.

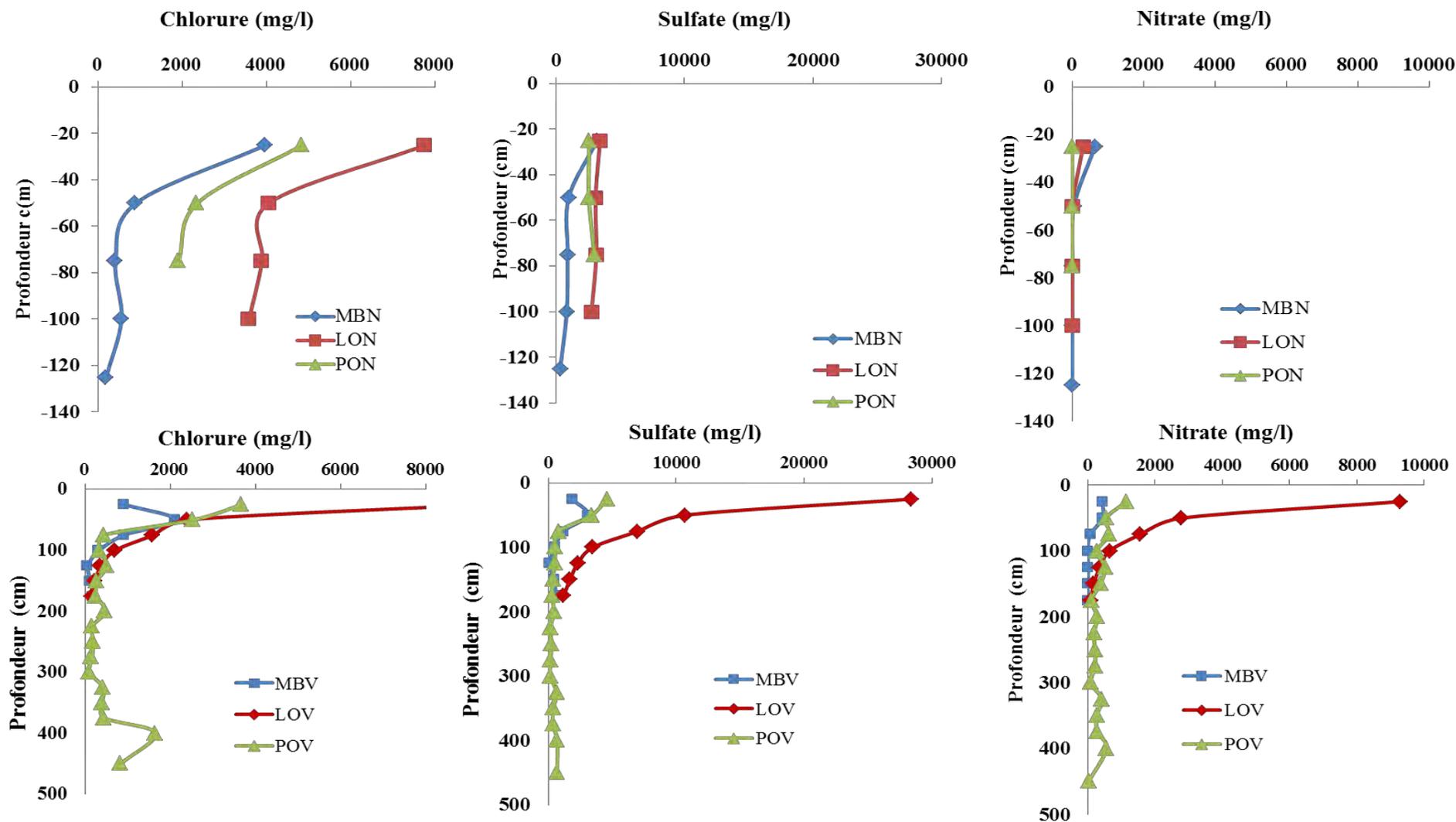


Figure 62 : Variation de la chimie des eaux interstitielles en fonction de la profondeur dans le centre (N) et versant (V) des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou (juin 2011)

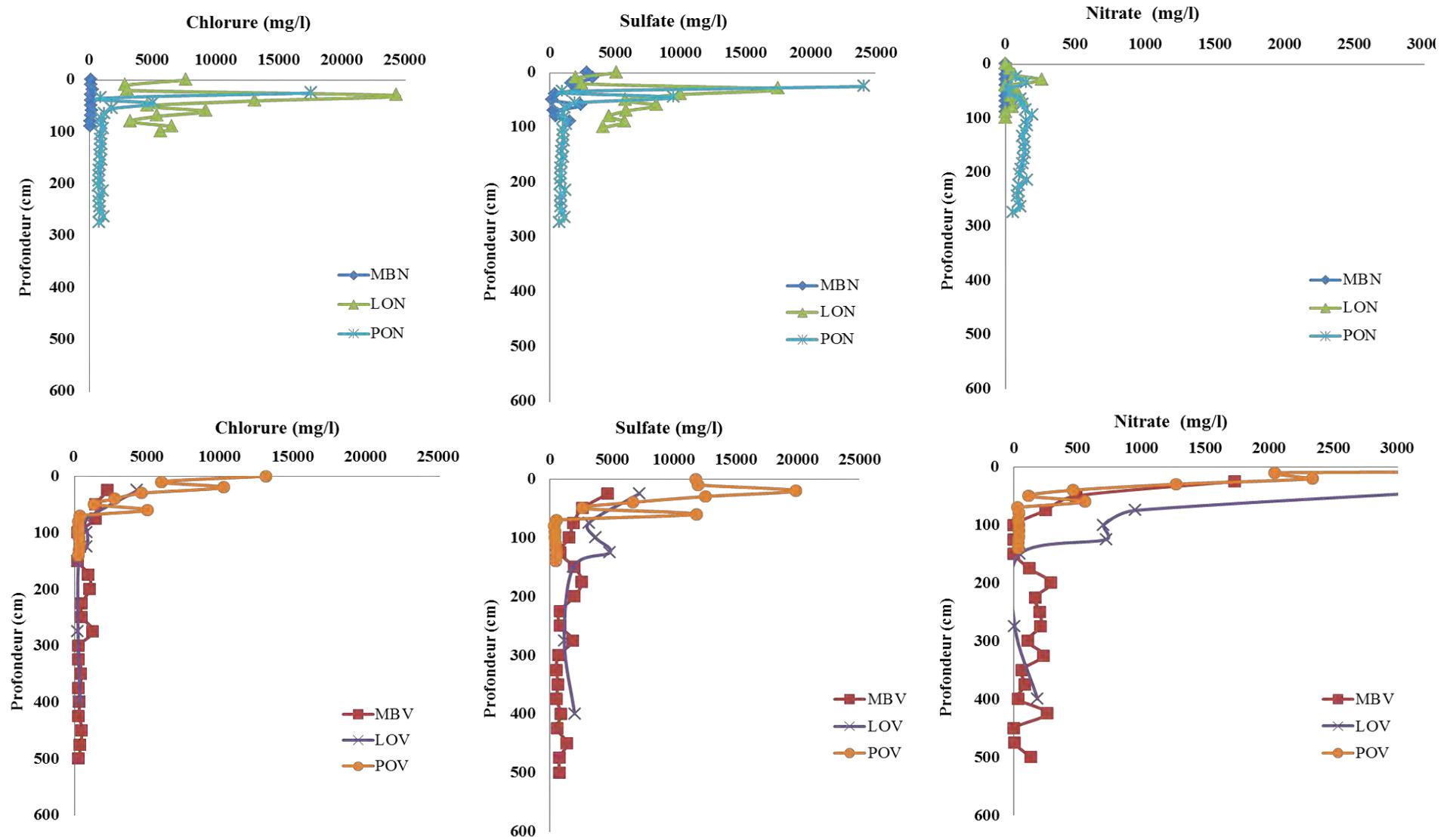


Figure 63 : Variation de la chimie des eaux interstitielles en fonction de la profondeur dans le centre (N) et versant (V) des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou (Février 2012)

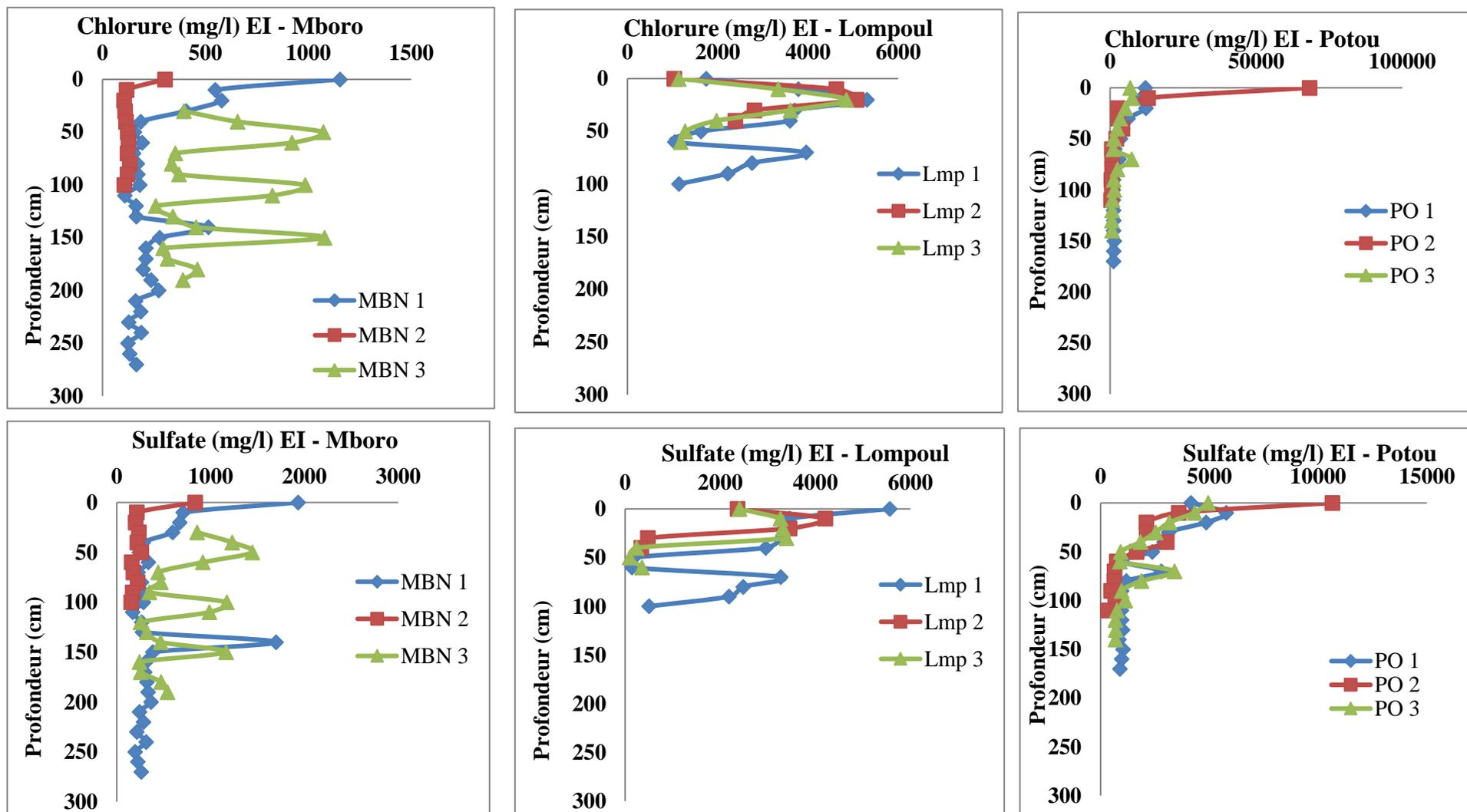


Figure 64 : Chimie des eaux interstitielles au niveau de trois profils dans le centre des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou (Octobre 2012)

Cependant, cette zone humide enregistre les plus forts taux de nitrate en surface du profil de la station centre de Mboro (637 mg/l) représentant le double de celui de Lompoul. Sur le versant de Lompoul, les taux de nitrates sont largement supérieurs à ceux de Mboro et Potou.

En Février 2012, Le profil ZNS du centre de la Niaye de Mboro (MBN) présente la zone la moins minéralisée par rapport aux deux autres stations centre de Lompoul (LON) et Potou (PON). Le profil LON présente un caractère chloruré sodique alors que PON est plutôt sulfaté calcique. Les concentrations en éléments chimiques dans la station centre des trois Niayes sont plus élevées en surface, puis diminuent et tendent à se stabiliser en profondeur. Concernant les Versants, celles de Potou sont largement plus minéralisées (14 000 mg/l de chlorure) représentant environ 7 fois le taux à MBV et 4 fois celui de LOV en surface (Figure 63). Ces valeurs diminuent et tendent à se stabiliser à partir de - 100 cm comme en fin de saison sèche. De plus, à cette période entre la fin de saison sèche et la saison des pluies, les profils ZNS de PON et LON présentent un transfert de contaminants (NO_3^- , NH_4^+) le long de la ZNS de la surface du sol jusqu'à la frange capillaire. Les Niayes montrent des pics de concentrations de NO_3^- de 258 mg/l à -30 cm à LON et de 195 mg/l à -95 cm à PON; et des pics de concentrations de NH_4^+ de 339 mg/l à - 25 cm et 65 mg/l à -100 cm aux stations centre respectives de Potou et Lompoul. Aussi, la surface du versant de Potou est un sol très riche en éléments nutritifs tels que K^+ (7 124 mg/l), Mg^{2+} (135 785 mg/l) et par la même occasion polluée NO_3^- (17 012 mg/l) et NH_4^+ (13 376 mg/l). Ceci peut être dû à la forte activité agricole de la zone qui est la principale source de revenus des populations environnantes. De plus, le front d'évaporation se positionne à -50 cm au centre de la Niaye et sur le versant plus bas à -100 cm. Ceci met en évidence le phénomène d'évaporation avec la dissolution des sels (NaCl , CaSO_4) très marquée à Lompoul puis à Potou et enfin à Mboro.

En Octobre 2012, notre intérêt a porté sur l'homogénéité ou l'hétérogénéité de la chimie des EI à une échelle plus fine en investiguant trois profils de ZNS distants de 1 m dont deux profils au niveau de la station centre et un dans la station versant de chacun des sites pilotes. Cette analyse montre une variabilité différente au niveau des trois zones humides. A l'exemple du sodium, les teneurs varient entre 939 à 77, 2108 à 655, 25 061 à 175 mg/l de la surface à la zone capillaire respectivement à Mboro, Lompoul et Potou (Figure 64). Ainsi, la chimie des EI est hétérogène à Mboro et présente des allures différentes pour les trois profils. Dans cette Niaye, les deux premiers profils présentent des éléments chimiques très concentrés en surface, diminuent et se stabilisent avec la profondeur. Cependant le troisième profil présente une alternance de concentrations faibles à fortes mettant en évidence trois pics caractéristiques (50, 100 et 150

cm de profondeur) pour l'ensemble des éléments chimiques. A Lompoul, les eaux sont plus minéralisées et plus homogènes mettant en évidence deux pics caractéristiques à 20 et 70 cm de profondeur. A Potou, la chimie des EI est hétérogène en surface et homogène le long du profil à partir du front d'évaporation à - 50 cm. Dans ce site les eaux sont plus minéralisées (68 275 mg/l de Cl) en surface qu'à Lompoul (1 740 mg/l) de Cl) et Mboro (1 153 mg/l) (Figure 64). Ceci est dû à la forte activité agricole sur le versant de Potou nécessitant de plus grandes quantités d'engrais et de pesticides dans un contexte climatique sahélien et de développement de la culture de l'oignon dans le cadre de la politique agricole nationale.

Ces engrais sont généralement minéraux (apports nutritifs essentiellement N, P, K) ou organiques (fumier, détritux). Ils vont améliorer la fertilité des sols et la croissance des plantes, et augmenter le rendement et la qualité des cultures. Utilisés en quantités importantes, ils peuvent impacter sur l'environnement en polluant la nappe phréatique par infiltration ou ruissellement dans les dépressions. Elle peut aussi entraîner des phénomènes d'eutrophisation des zones humides et de dénitrification donc dégazage de N₂ (Hadas, 1999). Ce dernier est un gaz à effet de serre contribuant au réchauffement climatique.

Les pesticides sont des substances destinées à lutter contre les parasites végétaux et animaux nuisibles aux cultures, aux récoltes et à l'homme notamment des herbicides, insecticides et fongicides. Dans les Niayes, les organophosphorés (32 %) et organochlorés (13 %) sont les plus utilisées. Les moins utilisés sont les pyréthrinoides (15%), carbamates (14 %), les dérivés et divers assemblages de produits (26 %) (Cisse et *al.*, 2001). La facilité d'accès aux pesticides parfois même des pesticides interdits notamment certains organochlorés (dichloro-diphényl-trichloro-éthane : DDT, Heptachlore, Endosulfan, alachlor, Dieldrine, Hexachloroexane, endrine) très riches en chlore est due à la multiplicité des points de vente de ces produits phytosanitaires et au manque de contrôles sur l'usage et la commercialisation de ces produits. Ces derniers sont utilisés par aspersion pour les petites surfaces, par pulvérisation manuelle ou motorisée, ou par ferti-irrigation pour les moyennes à grandes étendues de cultures. Ces substances peuvent conduire à des problèmes de santé publique (intoxication, troubles neurologiques ou cancérogènes) ou de pollution de l'environnement particulièrement des nappes. Cependant, des dispositions ont commencé récemment à être prises par l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles pour remplacer ces produits par des substances biologiques moins nocives. L'utilisation de ces fertilisants et pesticides en grande quantité entraîne ainsi une dégradation chimique des eaux interstitielles et souterraines notamment à l'augmentation des teneurs en ions comme le chlorure.

**PARTIE IV : FONCTIONNEMENT HYDRO-GEOCHIMIQUE ET SEDIMENTAIRE DE
L'ECOSYSTEME DES NIAYES SUR LE LITTORAL NORD**

Par ailleurs, le bromure a été mesuré en Octobre 2012, les pics de concentration de 281 mg/l à Potou et 2 mg/l à Mboro sont enregistrés en surface des profils. A Lompoul, le pic de bromure est de 20 mg/l à -20 cm. Ces fortes concentrations peuvent provenir en plus des pesticides, des embruns marins et aérosols principalement au Nord. En effet, le brome est un indicateur de la salinité des eaux comme le chlore démontrée précédemment dans la partie III. Il se distingue ainsi d'une part des sources anthropiques avec l'utilisation de certains insecticides et d'autres part des sources naturelles des embruns et aerosols avec la proximité de la mer qui contient en moyenne 67 mg/l de Bromure. Dans la nappe, il atteint en 2010 des valeurs de 25,7 mg/l à Semel avec une forte intrusion marine alors qu'à Keur Momar Sarr (2,2 mg/l) l'influence est moindre et à Mouril (1,1 mg/l) il est noté une forte contribution anthropique avec les cultures maraîchères et l'utilisation des fertilisants alors que les normes OMS sont fixées à 0,01mg/l. Aussi, les valeurs du delta ionique du bromure (ΔBr) dans les eaux souterraines de 207 et 135 mg/l à Semel et Potou au Nord confirme ces résultats. Toutefois des teneurs de 130 mg/l à Ngadiaga proche du Lac Tanma signalant des sources d'apport en bromure au Sud du secteur. Malgré que ce lac soit majoritairement asséché, sa présence influe sur la salinité des eaux souterraines. Ces résultats confirment ceux de Faye 1995 et Gaye, 1990. Les ratios Cl/Br correspondant à ces pics sont de 5577, 265 et 243 respectivement à Mboro, Lompoul et Potou. Ces forts taux peuvent être dû à la dissolution des minéraux évaporitiques tels que l'Halite avec des valeurs entre 1000 et 10.000 (Davis et *al.*, 1998) principalement à Mboro. A ceci s'ajoute le retour à la nappe des eaux usées dans un contexte de forte irrigation, de nappe peu profonde et de climat chaud pour les trois Niayes. Toutefois, les flux diffusifs et advectifs des ions dans les eaux interstitielles le long de la ZNS sont des phénomènes importants impliquant l'évolution des teneurs en Bromure témoignant de la salinisation des milieux (Dror, 1999).

Ces résultats mettent en évidence une variabilité spatio-temporelle à l'échelle locale des sites pilotes (H1) et à l'échelle régionale du Littoral nord (H2) de la chilie des eaux interstitielles. En effet, une classification de la minéralisation des eaux interstitielles le long de la ZNS peut être effectuée en fonction de la saison au niveau des trois zones humides. La Niaye de Lompoul est donc la plus minéralisée en saison sèche le long de la ZNS dans sa station centre et dans les 100 premiers centimètres sur son versant. En mi-saison sèche le centre de la Niaye de Lompoul et le versant de Potou présentent les concentrations en éléments chimiques les plus importantes. En saison humide, l'effet de dilution est marqué au niveau des profils ZNS de Mboro et

Lompoul, cependant la Niaye de Potou présente la plus forte minéralisation principalement en surface. Toutefois, la zone humide de Mboro reste la moins minéralisée quel que soit la saison.

XI.1.2. Carbone Organique Dissous

L'analyse du Carbone Organique Dissous total (COD) enregistre en saison sèche des concentrations variant de 54 à 9, 189 à 107 et 31 à 26 mg/l avec en moyenne 26, 155 et 34 mg/l dans les stations centre des Niayes respectives de Mboro, Lompoul et Potou (Figure 65). Dans les versants, les taux de COD varient de 644 à 11, 1535 à 93 et de 9186 à 127 mg/l avec en moyenne 121, 418 et 1619 mg/l respectivement à Mboro, Lompoul et Potou. Ces teneurs sont largement plus importantes sur les versants qu'au centre des Niayes avec les eaux les plus chargées en substances organiques dissoutes à Potou suivies de celle de Lompoul et enfin de celle de Mboro.

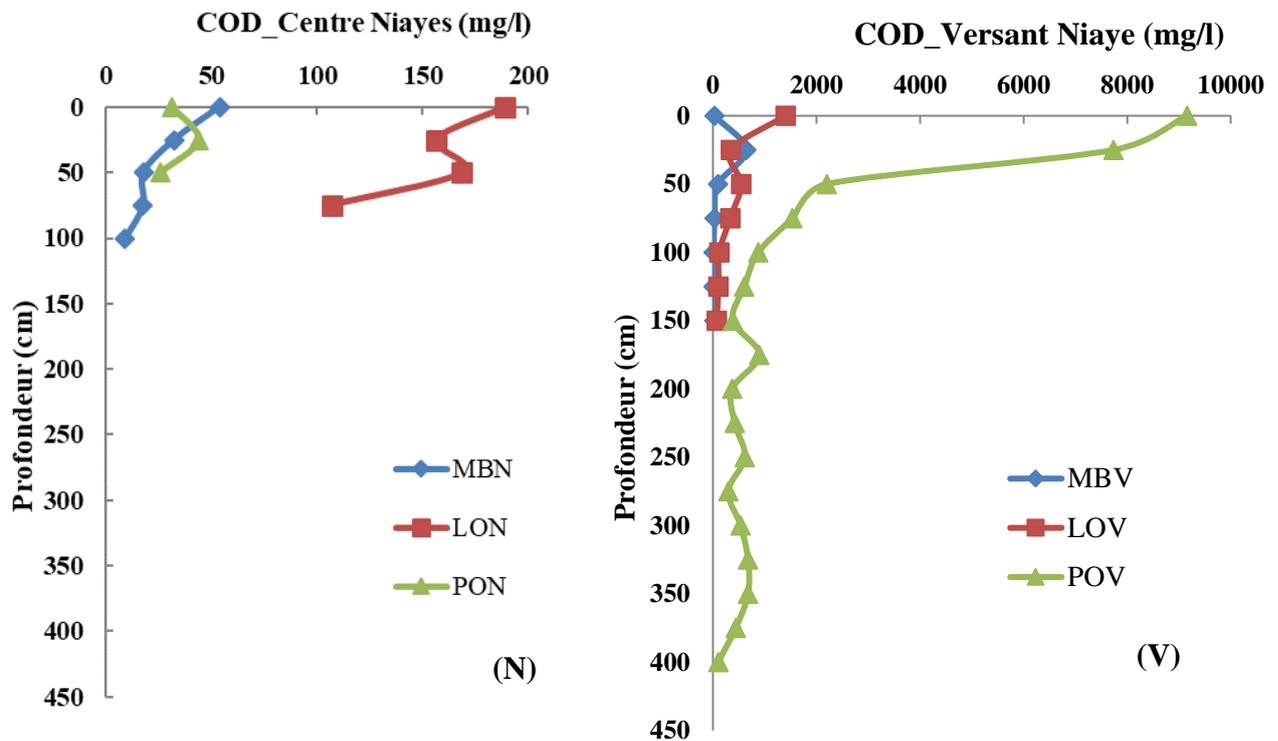


Figure 65 : Variation du Carbone Organique Dissous en fonction de la profondeur dans les stations centres (MBN, LON et PON) et versant (MBV, LOV et POV) des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou (juin 2011)

En saison humide d'octobre 2012, les gammes de valeurs de COD varient de 6 à 86 mg/l, de 251 à 486 mg/l et de 237 à 2411 mg/l en surface et de 4 à 60 mg/l, de 53 à 109 mg/l et de 9 à 15 mg/l au niveau de la zone capillaire respectivement à Mboro, Lompoul et Potou (Figure 66).

Ces teneurs mettent en évidence un gradient croissant de concentration de charge organique très importante en surface à Potou puis Lompoul et enfin Mboro.

Au niveau de la zone capillaire, la Niaye de Lompoul présente des concentrations les plus élevées suivies de celle de Mboro et enfin celle de Potou.

En Octobre 2013, l'analyse chimique des eaux interstitielles extraites à l'aide des bougies poreuses à des profondeurs précises (25, 50, 75, 125 cm) a montré que les concentrations chimiques en COD diminuent le long de ces deux compartiments à Mboro, augmentent à Lompoul, croissent jusqu'à - 50 cm puis décroissent à Potou. En effet, l'eau de sub-surface présente une concentration de 35 mg/l à Mboro et Lompoul et 65 mg/l à Potou. Elle est de 17, 161 et 148 mg/l à -75 cm et de 5, 162 et 60 mg/l à -125 cm respectivement à Mboro, Lompoul et Potou (Annexe IX). Ceci indique donc qu'à Mboro la colonne d'eau en sub-surface est plus chargée que les EI de la colonne sédimentaire. Par contre à Lompoul et à Potou, la colonne sédimentaire est plus chargée en matière organique dissoute que la colonne d'eau avec des teneurs plus importantes à Lompoul qu'à Potou. Ce gradient de concentration noté en saison sèche est donc conservé en saison humide mais avec des concentrations moins importantes. La richesse des sédiments en particules fines (Silts et Argiles) dans les parties supérieures des profils de Mboro comme démontré précédemment joue un rôle de filtre et retient une partie des substances organiques dissoutes dans la colonne d'eau. Cependant, une production plus importante de COD est notée dans les sédiments davantage à Lompoul qu'à Potou. Ce COD provient probablement d'une part de la décomposition des biomasses végétales et animales présentes au sein de ces zones humides et leur activité métabolique (Reddy et Delaune, 2008) ; d'autre part du lessivage des sols et des rejets agricoles, domestiques et industriels comme sources principales.

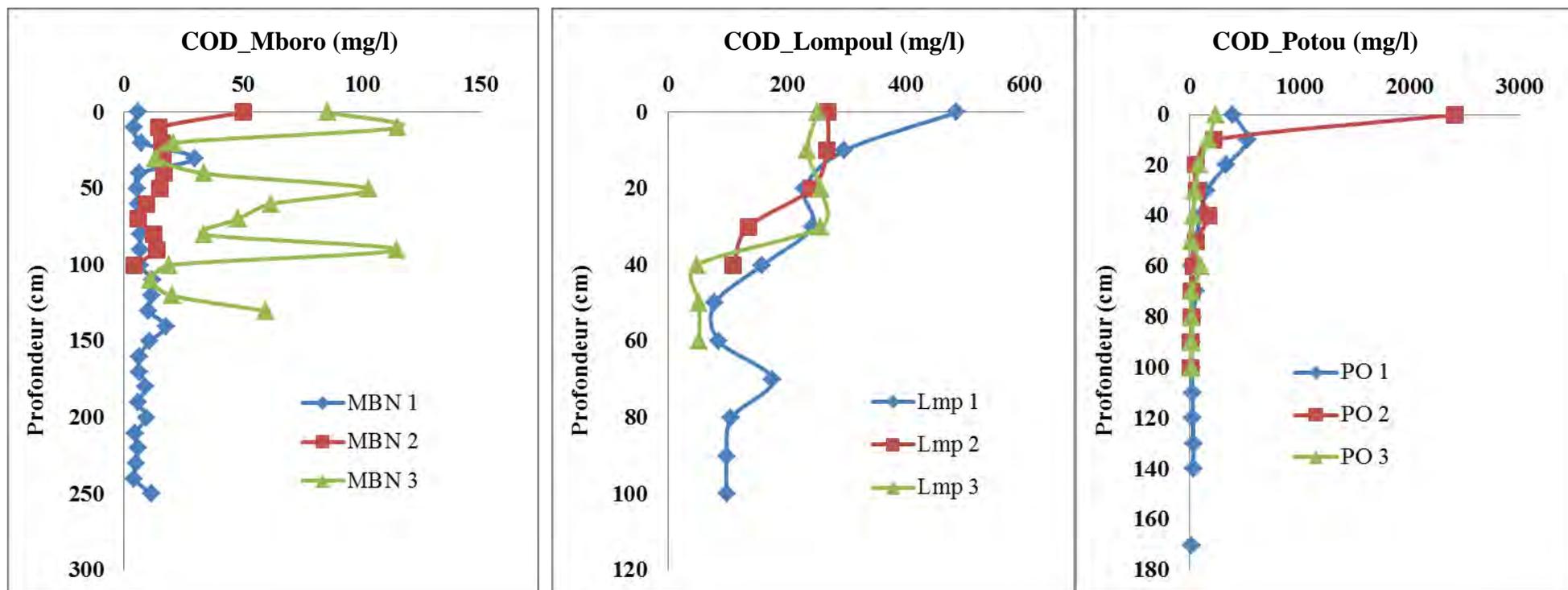


Figure 66 : Variabilité du Carbone Organique Dissous (COD) au niveau de trois profils dans le centre des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou (Octobre 2012)

XI.1.3. Sels nutritifs : Phosphate, Ammonium, Nitrates

Les profils de ZNS réalisés au niveau des trois stations en Octobre 2012 au sein de chaque Niaye montrent l'hétérogénéité de la chimie des eaux interstitielles dans les Niayes du Littoral Nord. En effet, la minéralisation globale des phosphates à Mboro enregistre des valeurs entre 827 et 2438 $\mu\text{P/g}$ en surface. Le front d'évaporation peu profond est atteint à -10 cm suivi d'une baisse pour atteindre des teneurs de 11 à 135 $\mu\text{P/g}$ au niveau de la frange capillaire (Figure 67). A Lompoul, les valeurs de phosphate total montrent une faible variation en surface de 822 à 936 $\mu\text{g P/g}$. A partir de -10 cm, ces teneurs diminuent et se concentrent entre 117 et 353 $\mu\text{gP/g}$ en profondeur.

A Potou, les teneurs de PO_4 varient entre 283 et 1140 $\mu\text{g P/g}$ mettant en évidence la forte hétérogénéité de la chimie des eaux interstitielles en surface. Les concentrations se stabilisent plus en profondeur entre -20 et -30 cm et atteignent des teneurs de 15 à 26 $\mu\text{g P/g}$ en zone capillaire (Figure 67). Cette diminution des teneurs en phosphore de 0 à -30 cm principalement peut s'expliquer son assimilation par les plantes pour leur nutrition. Ces valeurs s'annulent à partir de -40 cm pour les Niayes de Mboro et Potou mais elles conservent des teneurs moins importantes en profondeur pour la Niaye de Lompoul.

Les teneurs en Ammonium sont relativement homogènes dans la Niaye de Mboro, hétérogènes dans celle de Lompoul ; et à Potou les valeurs hétérogènes en surface et homogènes en profondeur. Ces taux atteignent 400, 60 et 32 mg/l en surface respectivement à Potou, Lompoul et Mboro (Figure 68). Ces nutriments sont abondants en surface sur les trois Niayes et diminuent avec la profondeur à Mboro et Potou alors qu'ils présentent des alternances entre phase d'accroissement et de diminution en profondeur à Lompoul. Ces teneurs peuvent se justifier par la forte pression anthropique principalement dû à l'infiltration des eaux usées agricoles, industriels et domestiques. Toutefois, la distribution et l'évolution des teneurs d'Ammonium très différente à Lompoul par rapport à Mboro et Potou peut se justifier par des sources d'apports en azote plus différenciés à Lompoul au sein de la Niaye et le long de la ZNS ainsi qu'aux conditions d'oxydo-réduction qui favorisent les réactions biogéochimiques en profondeur. L'ammonium provient ainsi d'une part de la fixation de l'azote atmosphérique par les plantes, les sédiments et les microorganismes, et d'autre part par la minéralisation de l'azote organique issu de l'assimilation biologique (Reddy et al., 2010, Findlay et Kendall, 2007).

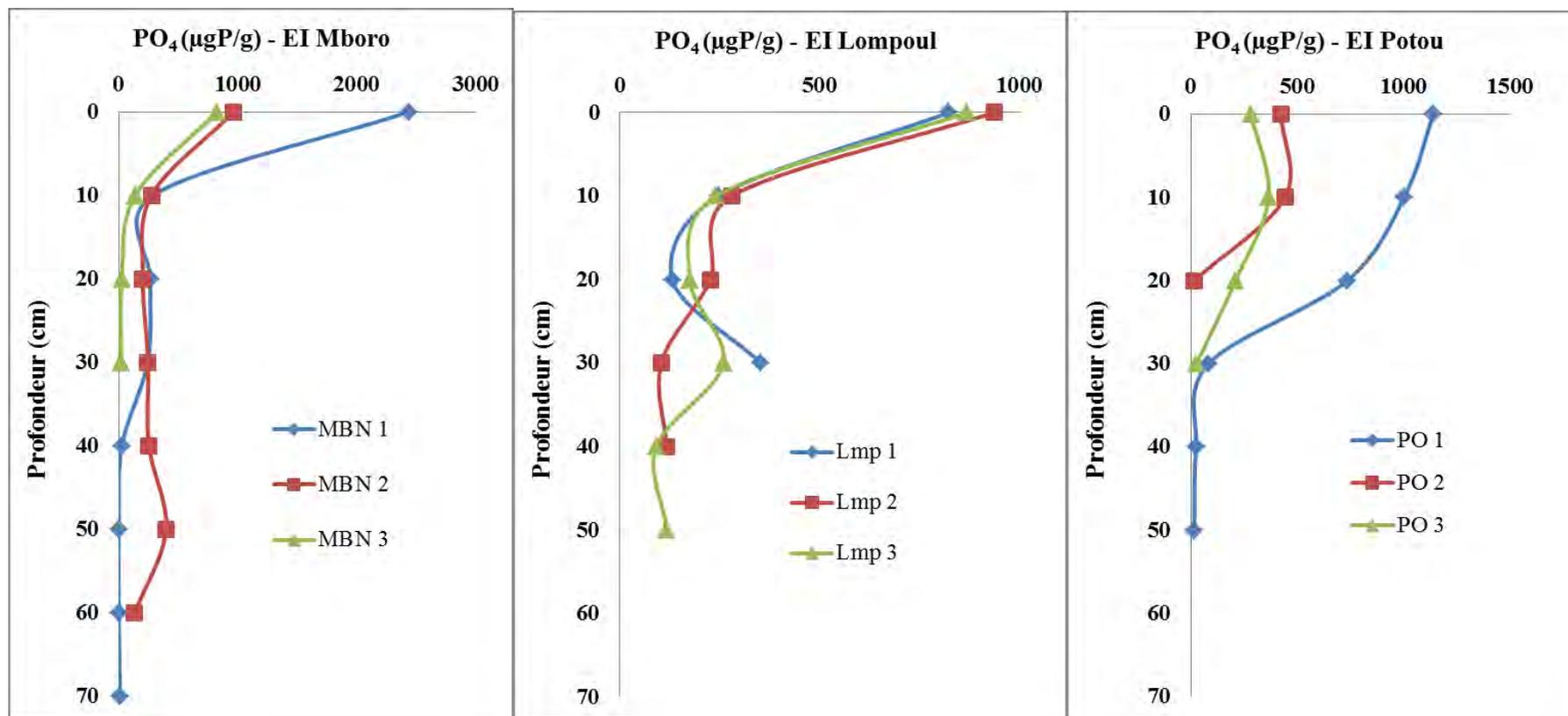


Figure 67 : Distribution des teneurs en PO₄ au niveau de trois profils dans le centre des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou (saison humide Octobre 2012)

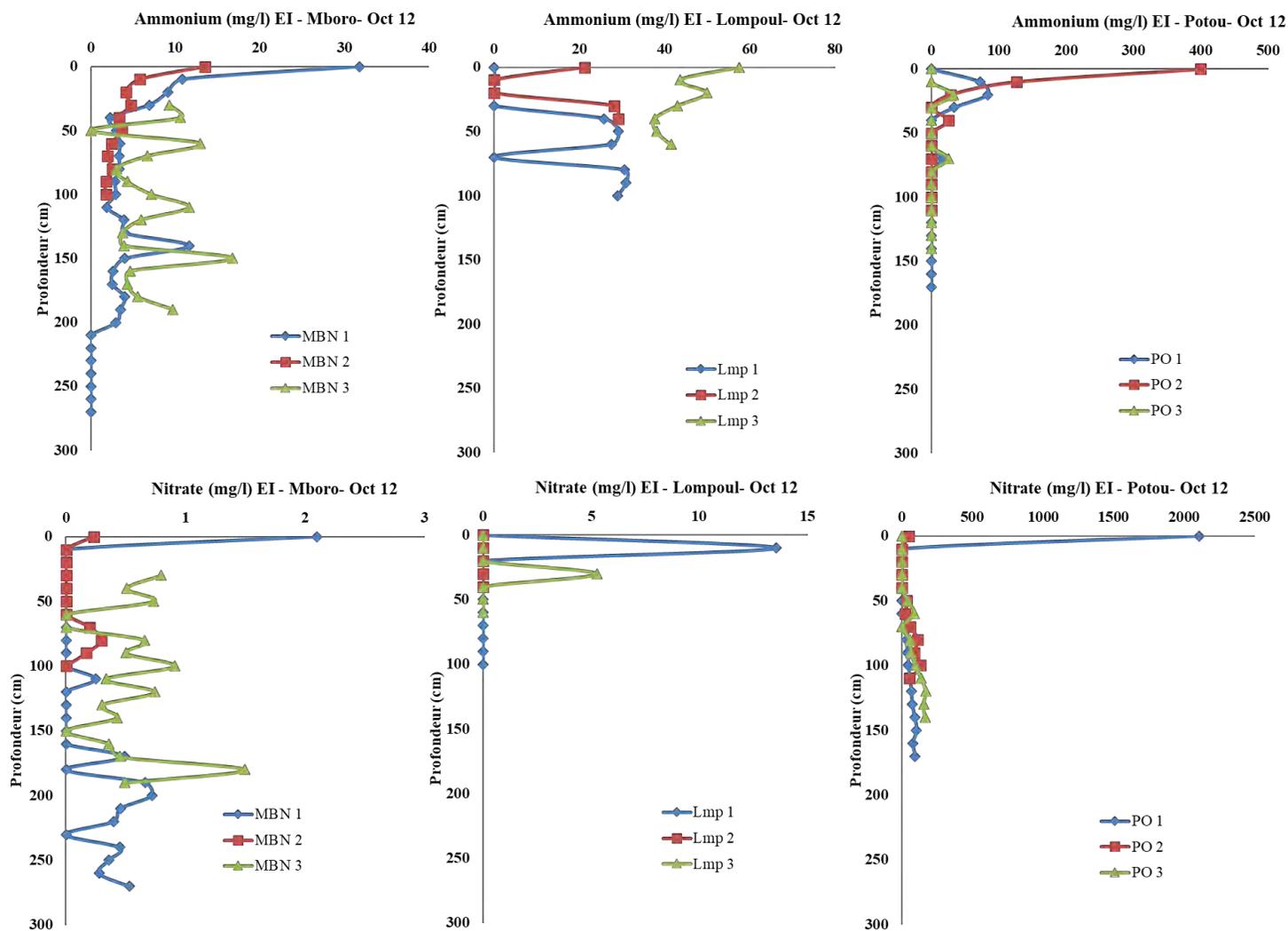


Figure 68 : Distribution des teneurs en NH_4 au niveau de trois profils dans le centre des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou (saison humide Octobre 2012)

**PARTIE IV : FONCTIONNEMENT HYDRO-GEOCHIMIQUE ET SEDIMENTAIRE DE
L'ECOSYSTEME DES NIAYES SUR LE LITTORAL NORD**

Par ailleurs, les valeurs de nitrates varient de 0 à 2, 0 à 58 et de 0 à 2107 mg/l respectivement à Mboro, Lompoul et Potou. Ces concentrations sont plus importantes pour le profil PO1 de Potou et généralement dans les parties supérieures des trois profils. A Mboro, il est noté une fluctuation des valeurs en nitrates le long de la ZNS inférieures à 2 mg/l. A Lompoul, des pics de concentrations caractéristiques de -15 cm (14 mg/l) et -25 cm (6 mg/l) puis ces taux s'annulent à partir de -50 cm jusqu'à la frange capillaire (-100 cm). A Potou, il y a une absence de nitrates de 0 à -40 cm sur les profils PO2 et PO3, puis une apparition des nitrates à partir de -50 cm respectivement 34 et 42 mg/l jusqu'aux zones capillaires -110 cm (57 mg/l) et -140 cm (166 mg/l) respectifs. Sur le profil versant PO1, les teneurs en nitrates diminuent et s'annulent à -10 cm, elles réapparaissent à -70 cm (45 mg/l) et atteint un pic de 106 mg/l à -150 cm puis diminuent à 96 mg/l au niveau de la frange capillaire (-170 cm). Ceci est suivie d'une réapparition des nitrates à partir de -50 cm jusqu'à la frange capillaire. Ces teneurs sont donc assez homogènes à Mboro et hétérogènes à Lompoul et Potou.

A Mboro, les teneurs en Nitrates et en Aluminium ont la même variation, cependant à Lompoul et Potou ses variations sont différentes plus accentués à Lompoul qu'à Potou.

En effet, les pics de nitrates à -15 cm pour Lmp1 et -25 cm pour Lmp2 correspondent à une disparition des concentrations d'ammonium. Ceci met en évidence la présence des processus du cycle de l'azote : Fixation - Ammonication - Nitrification – Minéralisation – Assimilation – Dénitrification (Reddy et Delaune, 2008). Ces résultats sur la variabilité des nutriments en relation avec la texture des sédiments et la géologie du secteur nous édifie sur le fait que la Niaye de Mboro est plus riche en phosphore que les deux autres car elle présente des sources diversifiées d'apports naturelles (roche encaissante) et anthropiques (engrais). A Potou, l'apport anthropique en azote est plus important qu'à Lompoul et Mboro. Ceci peut s'expliquer par l'utilisation d'engrais et pesticides à grande échelle pour couvrir le rendement agricole de ce pôle commercial, premier producteur d'oignon. La texture des sédiments est plus sableuse facilitant l'infiltration des eaux d'irrigation contaminant ainsi les eaux du sol et la nappe.

La Niaye de Lompoul est caractérisée par une homogénéité des teneurs en phosphore qui décroissent en fonction de la profondeur mais cependant une variabilité spatiale et le long de la ZNS de ces teneurs. Cette dernière peut se justifier en plus des apports anthropiques (rejets industriels, agricoles et domestiques, pollution atmosphérique) différents en surface par une alternance des processus géochimiques de dégradation de la matière organique le long des profils ZNS en fonction des conditions redox, de la quantité et de la qualité de la MO. En effet,

comme nous l'avons précédemment démontré la zone humide de Lompoul est la plus riche en matière organique particulaire. La maturité de cette MO et son état oxydé va entraîner la décomposition rapide de celle-ci. Elle se fera par les processus biogéochimiques du cycle de l'azote :

- l'ammonification qui est la transformation de l'azote organique en ammonium après fixation de l'azote minéral atmosphérique par, les sédiments, les végétaux et les microorganismes tant en milieu oxygène qu'à anoxique,
- la nitrification suivie de fixation chimique qui à partir des nitrates produit de l'ammonium
- la dénitrification qui épure les sédiments en azote en profondeur provenant des nitrates et de l'ammonium, et libère les gaz N_2 et NO_x dans l'atmosphère biodisponible pour la fixation chimique et la production d'azote organique.

Ainsi, la richesse en phosphore à Mboro est dû à des sources d'apports diversifiées naturelles et anthropiques. Les teneurs en ammonium sont plus importantes dans la Niaye de Potou que celles de Lompoul et Mboro. Ceci peut se justifier par l'utilisation intensive des engrais chimiques et fertilisants, l'infiltration des eaux usées et les processus de fixation d'azote atmosphérique et organique puis d'ammonification. Les nitrates proviennent aussi des engrais et des réactions de nitrification dans le cycle de l'azote. La Niaye de Lompoul se caractérise le long de la ZNS par la dégradation de la matière organique avec une alternance des processus d'ammonification et de nitrification-fixation chimique/dénitrification en profondeur.

Ces processus d'ammonification, de nitrification et de dénitrification ont été aussi mis en évidence dans la région de Dakar (Cisse, 2012, Diedhiou, 2011) et par d'autres auteurs tels que Xiao et *al.*, 2010, Xue et *al.*, 2009, Kendall, 2001. Il serait ainsi important de comprendre la relation entre la chimie de l'eau du sol et la nappe.

XI.1.4. Relations de la chimie des eaux interstitielles en rapport avec la fluctuation et la chimie de la nappe

Dans le secteur des Niayes du Littoral Nord, la remontée saisonnière de la nappe dans les dépressions inter-dunaires joue un rôle fondamental dans la composition chimique des eaux. A ceci s'ajoute le lessivage des sols et les processus géochimiques qui s'y développent. La nappe enregistre ainsi un niveau piézométrique en fin de sèche de 5,9 ; 4,9 et 2,3 m ; en mi-saison sèche de 5,1 ; 4,9 et 2,6 m; en saison humide un niveau 5,5 ; 4,6 et 2,7 m respectivement à Mboro, Lompoul et Potou. Le gradient du niveau de la nappe décroissant du Sud vers le Nord comme

mise en évidence dans la partie régionale de cette étude (cf Partie III) est observé au niveau de ces sites pilotes le long du Littoral. Le niveau de la nappe est plus élevé à Mboro et à Lompoul davantage en saison sèche qu'en saison humide. Cette nappe est plus exploitée dans la zone Sud que dans la partie centre du littoral. A Potou par contre, la variation du niveau de la nappe suit le cycle de la pluie, en diminuant en saison sèche puis en augmentant après les pluies. Ceci justifie le signal d'entrée dans le système aquifère au Nord du secteur qui est retardé dans les parties centrale et Sud.

Il existe donc une variabilité spatio-temporelle de la qualité des eaux interstitielles à l'échelle du Littoral Nord. En effet, la variation du niveau de la nappe va influencer la chimie des eaux interstitielles de la ZNS en fonction des saisons, des types de sol et des actions anthropiques :

- A Mboro, le type de sol plus silteux et argileux induit une forte capacité d'échange cationique qui augmente l'ampleur des processus géochimiques avec la présence de complexes argilo-humiques et de tourbes dans le secteur.
- A Lompoul, les solutés sont accumulés dans la ZNS et l'arrivée différée de la recharge de la nappe démontrée dans la Partie III va contribuer au fort lessivage des sols, à la dissolution des minéraux en plus de la charge organique importante qui entraîne la pollution des eaux de la nappe.
- A Potou, la structure des sols plus sableuse et le niveau de la nappe le plus faible facilitent l'infiltration des eaux et la dissolution des minéraux le long de la ZNS accompagnée d'une forte reprise évaporatoire.

Par ailleurs, ces trois sites pilotes ont la particularité d'être des zones dépressionnaires humides et agricoles soumises à des conditions climatiques, hydrologiques, hydrogéologiques et environnementales différentes. Ceci va entraîner ainsi à différentes échelles la dégradation de la qualité chimique des eaux interstitielles et par conséquent celles de la nappe phréatique. Les eaux interstitielles sont plus chargées en éléments chimiques que la nappe phréatique car la ZNS joue un rôle de « piège » d'éléments chimiques et par conséquent épure l'eau qui atteint la nappe. Celle-ci présente, en fonction de la position dans le site et de la saison, des caractéristiques différentes.

Aussi, les paramètres caractéristiques des eaux tels que la conductivité électrique, le carbone organique dissous, la salinité, la profondeur de l'eau et la charge en oxygène dissous montrent une variation claire en fonction des saisons avec les valeurs les plus importantes en saison sèche

(SS) et en saison humide (SP) par rapport à la période mi-saison sèche (ST). La Conductivité Electrique (EC) varie entre 3710 et 970 $\mu\text{s}/\text{cm}$ à Potou, entre 3340 et 990 $\mu\text{s}/\text{cm}$ à Lompoul respectivement en SS et ST. A Mboro, l'EC est maximale en SP (2440 $\mu\text{s}/\text{cm}$) et se limite 1290 $\mu\text{s}/\text{cm}$ en ST. Cette tendance au niveau des trois sites est confirmée par les valeurs de salinité qui varient à Potou de 2,2 à 0,5 ‰ respectivement en SS et ST. Les eaux de la nappe sont plus acides à Mboro et à Lompoul en SS et ST alors qu'elles sont neutres à Potou. Le COD enregistre les plus fortes teneurs de 1014 et 336 mg/l à Potou et Lompoul respectivement en saison humide. Les teneurs en oxygène dissous maximales à Lompoul (12,3 mg/l) en saison sèche témoignent des processus d'oxydation de la MO. En saison sèche, les eaux souterraines de Mboro et Potou sont en milieu réducteur alors qu'elles sont en milieu oxydant en ST. Les températures des eaux de la nappe sont plus élevées en saison humide par rapport à la saison sèche avec des valeurs variant de 33°C à Mboro en SP à 22°C à Lompoul en ST.

Par ailleurs, la salinité est un indicateur spécifique de la variabilité de la fluctuation de la chimie de la nappe. Ainsi, un gradient décroissant de la salinité est mis en évidence dans les secteurs Nord et centre de la grande côte (Tableau 14). Il est en fonction des saisons avec des fortes teneurs en fin de saison sèche suivi des taux intermédiaires en saison humide et enfin des faibles taux en mi-saison sèche. Ce gradient de salinité est plus marqué au Nord qu'au centre du Littoral Nord. Cependant, à Mboro dans la zone Sud, le pic de salinité est enregistré en saison humide (Figure 69). Le fonctionnement hydrogéochimique des secteurs Nord et Centre confirme les résultats de l'étude régionale sur la recharge différée de la nappe avec un niveau maximum en mi- saison sèche (Février) qui diluent les concentrations chimiques des eaux de la nappe et celle des eaux interstitielles. Le secteur Sud présente un processus hydrogéochimique plus retardée certainement dû à la lithologie des sols et l'épaisseur de la ZNS. Une corrélation peut donc être mise en évidence la chimie de la nappe et la qualité des eaux interstitielles présentant une variation similaire.

Tableau 14 : Caractéristiques des eaux de la nappe des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou en fin saison sèche (1), mi-saison sèche (2) et en saison humide (3)

SP-Campagne	pH	Conductivité (µS/cm)	COD (mg/l)	Salinité (‰)	NS	Temp	O ₂	Eh
					(m)	(°C)	(mg/l)	(mV)
Potou (1)	7,0	3710	33,5	2,2	2,8	28,8	1,9	-103
Lompoul (1)	6,7	3340	155,1	1,8	0,7	27,5	12,3	123
Mboro (1)	5,7	1290	43,5	0,7	0,7	24	5,7	-360
Potou (2)	6,5	978	17,3	0,5	0,3	24,3	2,3	-28
Lompoul (2)	6,0	990	2,2	0,5	1,2	22,3	4,0	395
Mboro (2)	6,1	1442	3,7	0,8	0,7	20,3	1,0	200
Potou (3)	7,5	2600	1014,0	1,3	2,2	29	4,1	330
Lompoul (3)	4,1	2810	335,5	1,5	0,9	29,1	3,5	-
Mboro (3)	4,4	2440	68,0	1,2	0,6	33	3,7	20

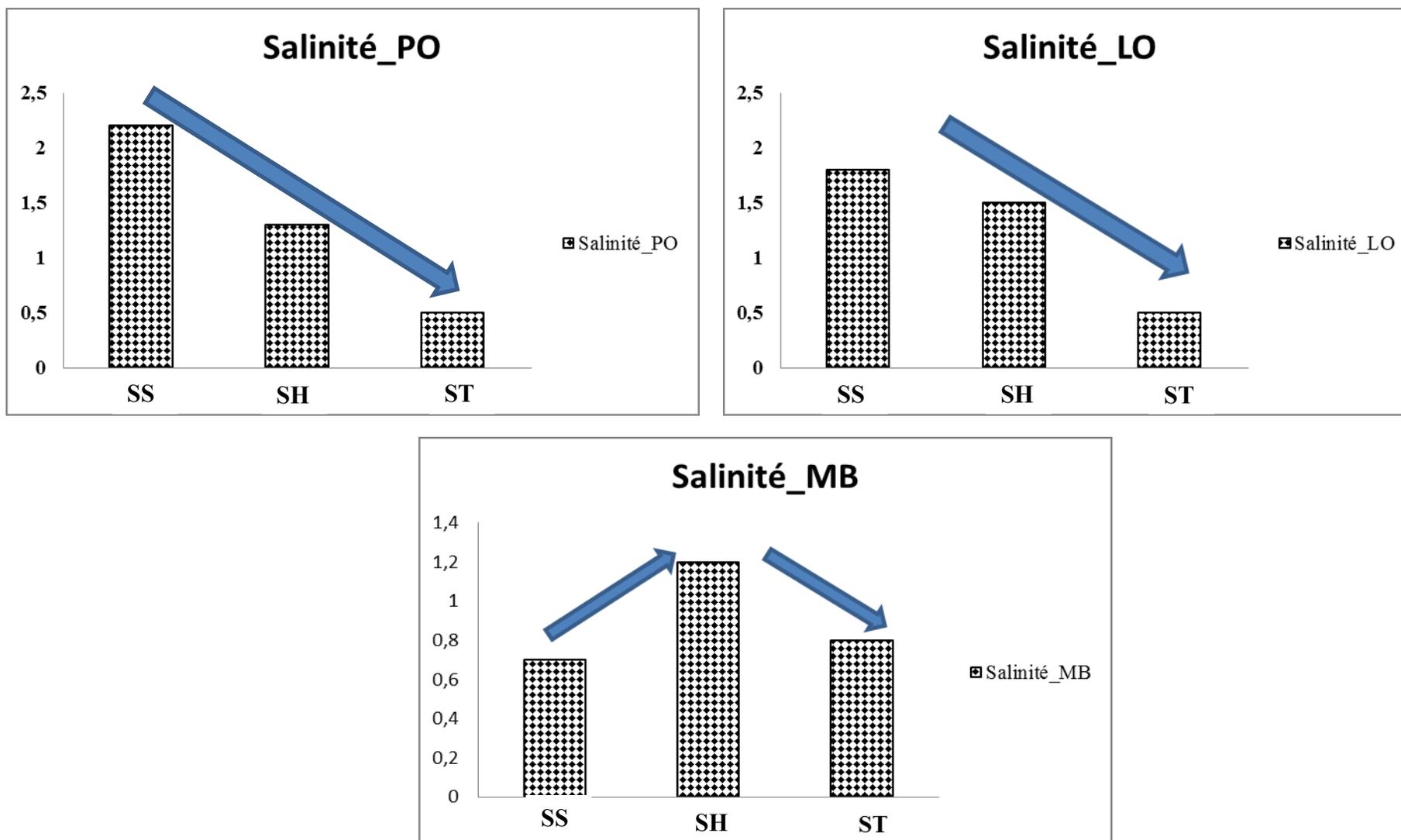


Figure 69 : Variabilité de la salinité en fonction des saisons dans les Niayes de Mboro (MB), Lompoul (LO) et Potou (PO) en saison sèche (SS), période de transition (ST) et humide (SH)

Ainsi, les zones humides de Mboro, Lompoul et Potou présentent chacune des caractéristiques spécifiques et variables en fonction des saisons et de la position au sein de la Niaye impactant sur la chimie des eaux interstitielles ; et les transferts hydriques et géochimiques différents le long des ZNS de chaque zone humide. Ces particularités se retrouvent aussi dans les eaux souterraines du Littoral Nord aujourd'hui très vulnérables aux différentes sources de pollution.

XI.2. Processus isotopiques de transfert des eaux dans la zone non saturée

XI.2.1. Inputs « pluies »

La Géochimie isotopique des eaux de pluies a été mise en évidence par l'ensemble des événements pluvieux de juin à octobre au cours des années 2012 et 2013. Elles ont été collectées au niveau des stations pluviométriques de Mboro, Kebemer et Potou proches des sites pilotes étudiés.

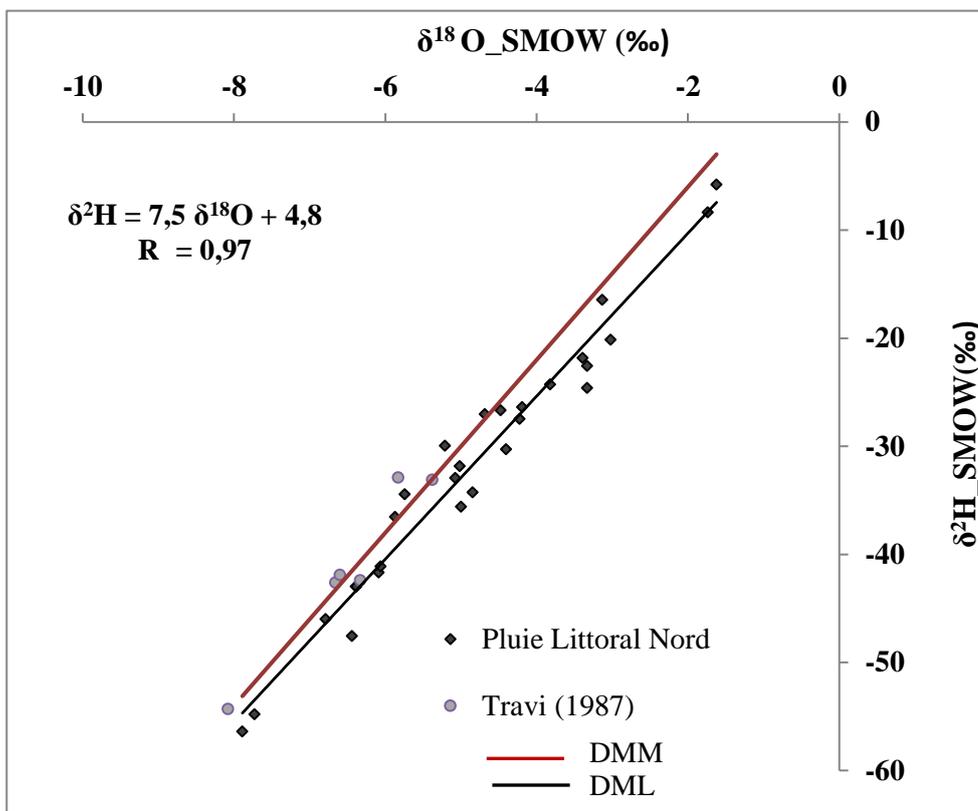


Figure 70 : Composition isotopique des eaux de pluie du Littoral Nord en 2011 et 2012 (Mboro, Kebemer et Potou) et ceux de Travi, 1987

Cette analyse montre que ces eaux sont faiblement évaporées par rapport à la Droite Météorologique Mondiale (DMM) et proches de la Droite Météorologique Locale (DML). Elles sont d'équation $\delta^2\text{H} = 7,5 \delta^{18}\text{O} + 4,8$ avec $R = 0,97$. Ces eaux ont une tendance similaire à celles de Travi, (1987). En effet, ce dernier à analyser les eaux de pluie dans différentes stations au Sénégal (Mbour, Diafalon, Tambacounda, Richard Toll) et l'équation de celles-ci est $\delta^2\text{H} = 7,9 \delta^{18}\text{O} + 10,2$ très proche de la DMM (Figure 70).

XI.2.2. Eaux interstitielles

L'analyse isotopique des eaux montre des teneurs qui varient entre - 4,3 à - 3,3 ‰, -3,9 à -0,2 ‰, - 4 à -3,4 ‰ respectivement à Mboro, Lompoul et à Potou en saison sèche (Figure 71). Il faut noter que par manque d'échantillons d'eaux interstitielles, nous n'avons pas pu analyser la partie supérieure du profil ZNS du centre de la Niaye de Potou et les profils versants. Cette figure présente un gradient de concentration d'enrichissement des eaux du Sud au Nord de la zone du Littoral Nord. A Mboro, la composition isotopique est assez homogène le long du profil ZNS avec un front d'évaporation à -50 cm (Fontes et Edmunds, 1989, Barnes et Allison, 1983). A Lompoul la tranche de sol de - 40 à - 80 cm est très enrichie. La partie supérieure du profil de Potou montre les teneurs les plus élevées qui diminuent avec la profondeur. Cet enrichissement peut être dû à la forte reprise évaporatoire plus importante au Nord qu'au Sud, à la proximité de l'océan induisant la présence des embruns marins et aérosols. De plus, la lithologie des sols et la densité du couvert végétal impactent sur l'enrichissement isotopique. Les données obtenues par les eaux interstitielles extraites des bougies poreuses ont permis de faire une étude comparative entre la composition isotopique des eaux en saison sèche et en saison humide aux mêmes profondeurs au niveau des trois zones humides. Ces eaux interstitielles présentent donc des teneurs isotopiques variant entre -5 et -4 ‰ en saison sèche, et en saison humide, cette composition isotopique varie de - 6,1 à - 3,7 ‰ (Figure 72). Ainsi, en saison sèche, le secteur centre du Littoral Nord présente des eaux plus évaporées alors qu'en saison humide le secteur Nord présente les eaux les plus enrichis.

Les valeurs de tritium mesurées dans les pluies et les eaux souterraines varient respectivement entre 1,4 et 4 TU ; et entre 0,7 et 4,2 TU comme l'on a démontré dans la Partie III à l'échelle régionale. Ces résultats montrent la présence des eaux récentes et l'infiltration qui se fait directement par les eaux de pluies. Les eaux de la nappe au niveau des sites pilotes de Mboro, Lompoul et Potou ont respectivement des teneurs en tritium de 2,1 ; 1 et 1,8. Ainsi les eaux

sont plus récentes sont localisés à Mboro et Potou par rapport à Lompoul. Les eaux moins récentes à Lompoul peuvent issues d'un mélange d'eaux de pluie récentes et/ou de tritium désintégré. Elles peuvent aussi avoir un temps de séjour (plus de 35 ans d'après Schroll, 1966) atténuant ainsi la recharge verticale et les apports latéraux en piégeant l'eau dans la partie tourbeuse en profondeur. Par ailleurs, la partie d'enrichissement maximum entre - 40 et - 60 cm à Lompoul démontrée précédemment peut délimiter une zone de transition entre la montée capillaire et le flux de vaporisation (Aranyossy, 1991).

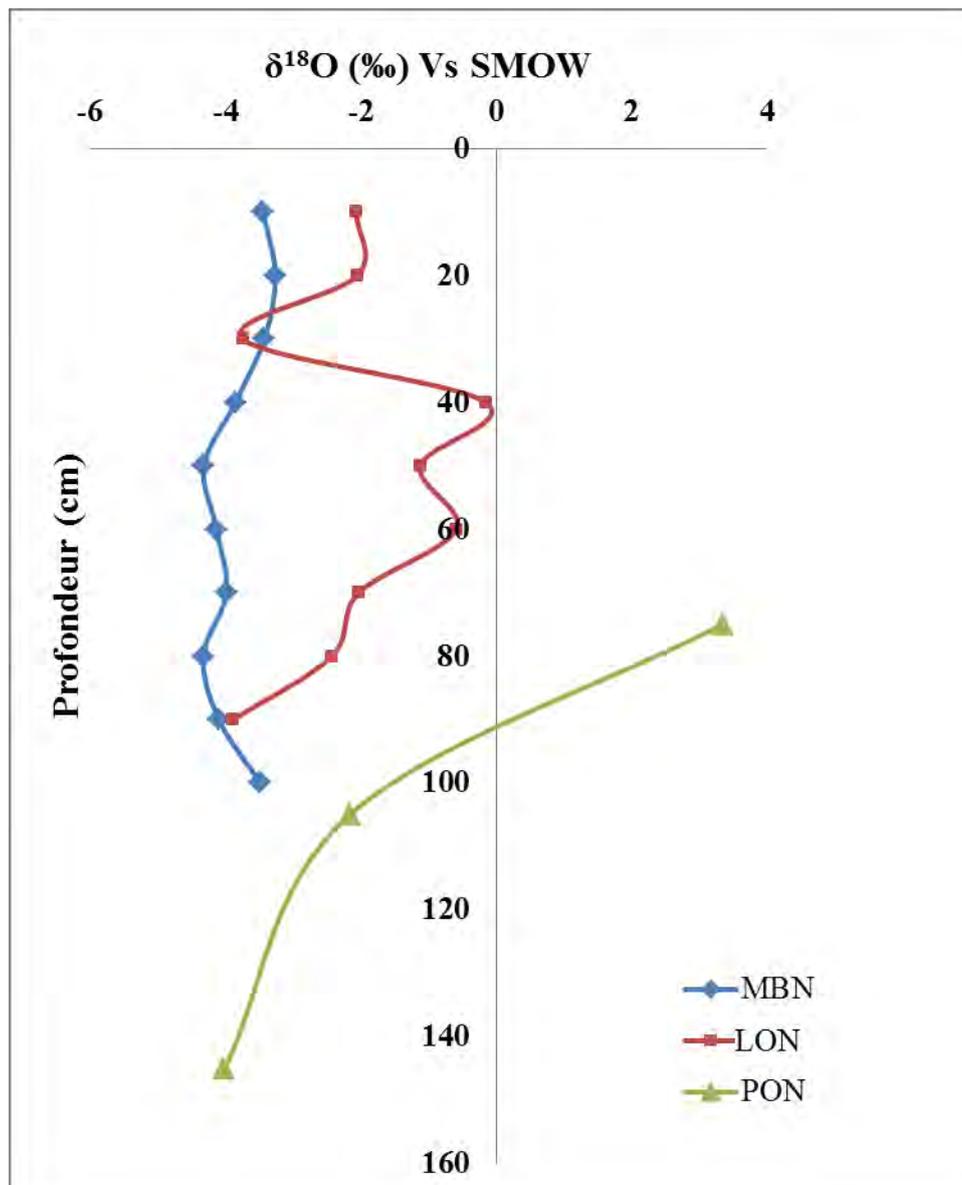


Figure 71 : Variation des valeurs de ^{18}O à Mboro, Lompoul et Potou des EI provenant interstitielles extraites par centrifugation en saison sèche

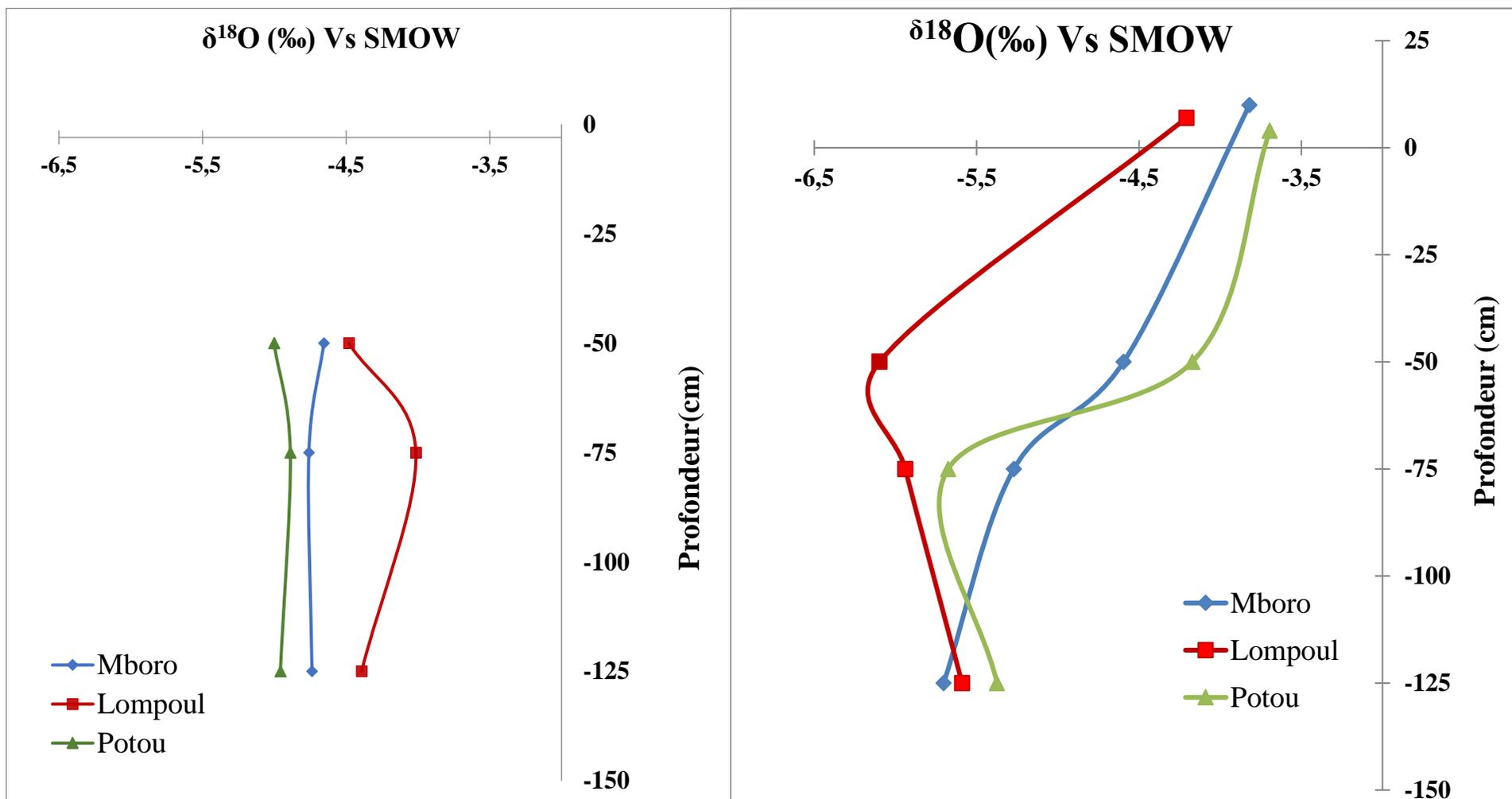


Figure 72 : Variabilité des valeurs de ^{18}O dans les Niays de Mboro, Lompoul et Potou provenant des bougies Poreuses en saison sèche (A) et post-pluviale (B)

XI.1. Variabilité saisonnière sur la qualité des eaux

L'analyse de la Figure 73 montre que les eaux interstitielles sont plus évaporées quel que soit la saison. Elles sont plus évaporées en saison sèche et elles ont une signature isotopique approximative à la DML en saison humide selon les équations :

$\delta^2\text{H} = 4,5 \delta^{18}\text{O} - 9,6$ ($R = 0,90$) et $\delta^2\text{H} = 6,1 \delta^{18}\text{O} - 3,1$ ($R = 0,75$) respectivement en Février et Octobre 2012.

En saison sèche (Février 2012), les eaux plus enrichies se localisent dans la partie centrale du LN à Lompoul et principalement en profondeur de 40 à 80 cm avec des teneurs entre -2 et 0 ‰. Il s'en suit les eaux interstitielles de Mboro et Potou qui sont évaporés beaucoup plus en surface qu'en profondeur. On note qu'à Mboro à -20 cm, ces eaux ont la même composition isotopique que la DML signalant l'input d'entrée dans le système aquifère (Figure 73-A). Cette même tendance se retrouve en saison humide (Octobre 2012) avec des taux plus faibles montrant des eaux interstitielles plus enrichies à Lompoul puis à Mboro et enfin à Potou (Figure 73-B).

En Octobre 2013, ces eaux sont principalement évaporées dans les parties superficielles des profils de ZNS (Figure 74). Les eaux interstitielles des trois des Niayes sont peu évaporées par rapport à la DMM et à la DML selon l'équation $\delta^2\text{H} = 6,1 \delta^{18}\text{O} - 0,8$ ($R^2 = 0,89$) et moins évaporées qu'en 2012. Les parties enrichies sont les zones superficielles à Mboro et à Potou. En profondeur, principalement à Mboro et à Lompoul, il est noté des phénomènes de condensation avec des eaux interstitielles ayant une signature isotopique au-dessus de la DMM. Ceci peut se justifier par une pluviométrie excédentaire en 2013 sur tout le Littoral Nord au niveau des stations proches de nos sites pilotes avec 629, 582 et 376 mm respectivement à Mboro, Kébémér et Saint-Louis.

Aussi, l'analyse isotopique des eaux interstitielles extraites par bougies poreuses permet de distinguer un gradient décroissant des teneurs en $\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^2\text{H}$ en fonction de la profondeur à Mboro et à Potou. Cependant, ce gradient n'est pas respecté à Lompoul avec des eaux moins enrichies à -50 cm de profondeur. Ceci met en évidence l'effet « piston-flow » lors de l'infiltration de ces eaux. En Octobre 2013, le profil de Mboro reste le plus caractéristique avec des eaux très évaporées à -25 cm (-3,6 et -26 ‰), de même signature isotopique que la DML à -50 cm (-4,6 et -29,9‰), de même signature que la DMM à -75 cm (-5,3 et -32,1 ‰) et des eaux à signature isotopique condensée à -125 cm (-5,7 et -33,7‰). Cependant, le croisement entre la DMM et la droite de tendance des eaux interstitielles (DEI) se localise à Potou à -75 cm de profondeur (-5,7 et -36,2 ‰). Ceci met en évidence le signal d'entrée des eaux du Littoral Nord dans la ZNS qui se fait en premier dans la partie Nord.

**PARTIE IV : FONCTIONNEMENT HYDRO-GEOCHIMIQUE ET SEDIMENTAIRE DE
L'ECOSYSTEME DES NIAYES SUR LE LITTORAL NORD**

Dans le détail, les équations de la signature isotopique des eaux interstitielles de chaque zone humide sont les suivantes :

- A Mboro: $\delta^2\text{H} = 4,1 \delta^{18}\text{O} - 10,8$ (R =0,99)
- A Lompoul: $\delta^2\text{H} = 7,2 \delta^{18}\text{O} + 6$ (R =0,99)
- A Potou: $\delta^2\text{H} = 7,3 \delta^{18}\text{O} + 4,3$ (R =0,89)

Ainsi, malgré que les eaux interstitielles présentent un faible fractionnement isotopique en général, l'enrichissement isotopique est plus important à Loumpoul qu'à Mboro et Potou, et davantage dans les parties superficielles qu'en profondeur.

Par ailleurs, les travaux de Youfsi et *al.*, 1985 estiment le flux d'évaporation à travers un sédiment fin autour de 1 mm/an en climat aride en Algérie. De plus, la concentration des sels dans la partie en surface de la ZNS se fait sous l'effet de l'évapotranspiration. Ce mécanisme du mouvement ascendant de l'eau du sol est dominant à partir de la profondeur où le transit se fait en phase vapeur. Celui-ci est associé à la diffusion verticale descendante en phase des solutés et de l'eau accumulée en surface. Aussi, le transit de l'eau dans la ZNS sous l'effet de l'évaporation s'accompagnerait donc de trois phénomènes qui modifient la composition isotopique (Allison et Hughes, 1983, Barnes et Allison, 1983, Zimmerman et al., 1967) : (i) un enrichissement isotopique gouverné par les paramètres température, humidité relative de l'atmosphère libre au-dessus du sol, composition isotopique de la vapeur atmosphérique et composition isotopique de l'eau qui alimente le système aquifère; (ii) une diffusion de la vapeur atmosphérique dans la partie supérieure du profil où se produit essentiellement le transfert gazeux; (iii) un transfert vers le bas du profil par diffusion en phase liquide des isotopes lourds qui ont tendance à se concentrer préférentiellement dans la partie supérieure de la ZNS où le transit en phase liquide est dominant.

Ainsi, la signature isotopique du signal d'entrée dans le système aquifère, la variabilité saisonnière et l'effet piston flow dans la ZNS de lithologie et d'épaisseur différentes en fonction des sites influencent directement la qualité des eaux dans le secteur du Littoral Nord. De plus, la présence de la végétation entraîne un enrichissement isotopique en profondeur et un faible taux d'évaporation à la surface du sol. De ce fait, les eaux interstitielles des sols subissent donc un fractionnement isotopique au cours de l'alimentation en eau des plantes par les racines. Toutefois la décomposition de la matière organique en contexte climatique aride peut modifier la composition isotopique des eaux (Allison et *al.*, 1983). Ceci se fait donc en fonction du type de végétation, de sa biomasse et sa capacité de rétention en eau. Ces phénomènes caractérisent ainsi les eaux interstitielles des zones humides agricoles. A ceci s'ajoute les processus de mélange et de circulation active des eaux de la nappe démontrés précédemment dans l'étude régionale qui impactent sur la qualité de la ressource en eau du Littoral Nord.

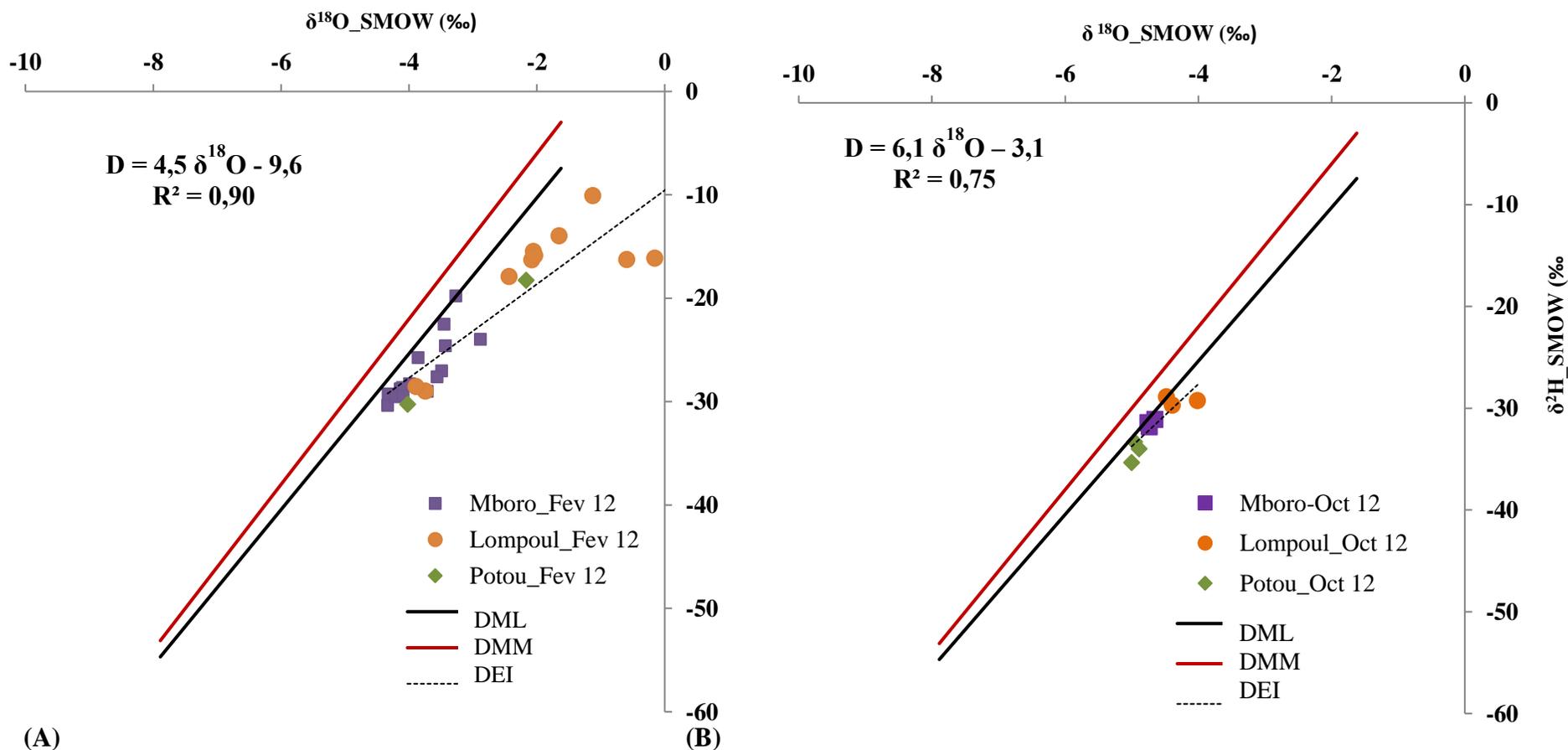


Figure 73 : Composition isotopique des eaux interstitielles en saison sèche (A) et humide (B) de 2012 (DML: Droite Météorologique Locale, DMM: Droite Météorologique Mondiale, DEI: Droite des Eaux interstitielles)

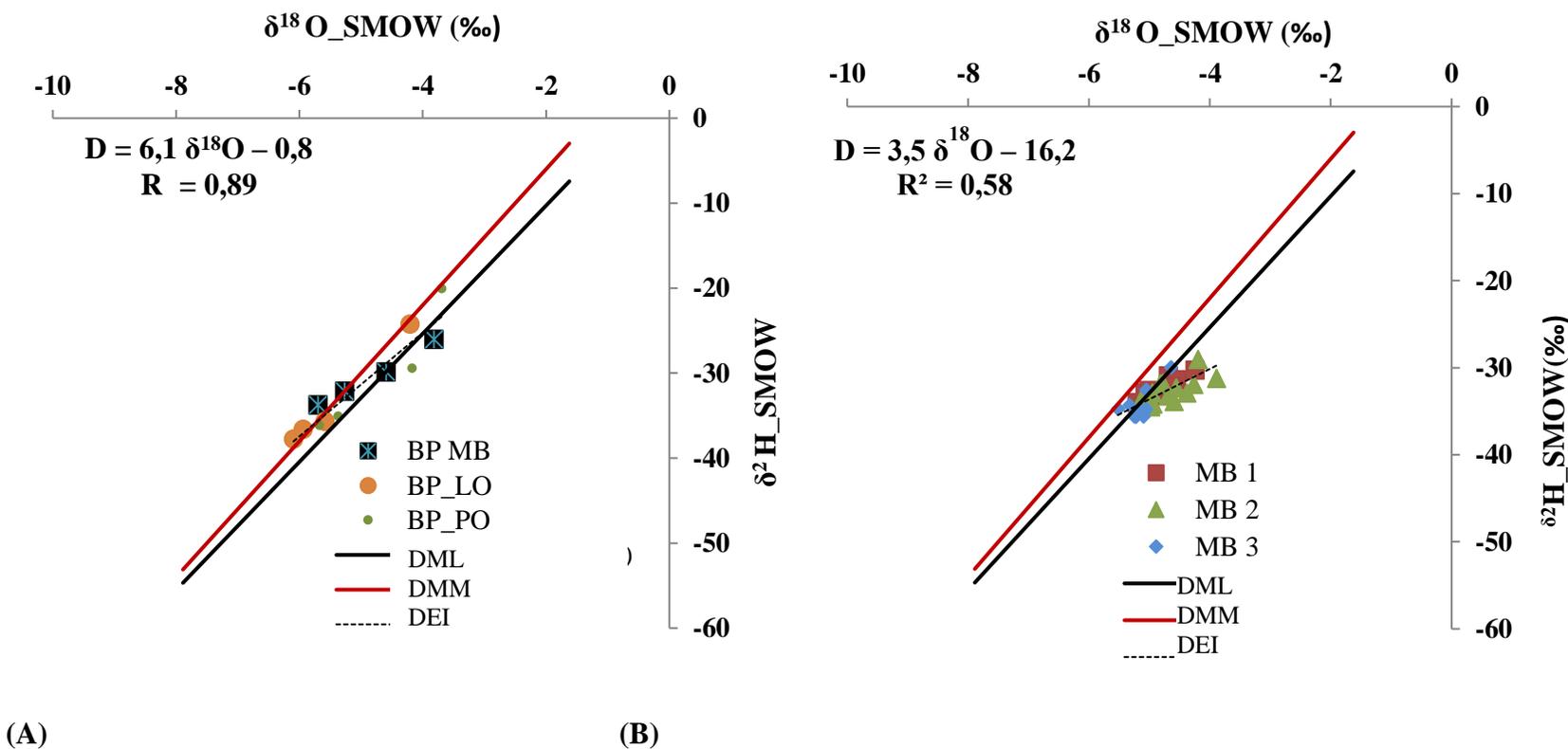


Figure 74 : Composition isotopique des eaux interstitielles en saison post-pluviale de 2013 dans la ZNS des trois Niayes de Mboro-Lompoul-Potou (A) et sur un transect Versant-Centre-Bas fond de la Niaye de Mboro (B)
(DML: Droite Météorologique Locale, DMM: Droite Météorologique Mondiale, DEI: Droite des Eaux interstitielles)

Conclusion du Chapitre XI

Les zones humides de Mboro, Lompoul et Potou présentent chacune des caractéristiques hydrochimiques et géochimiques variables en fonction des saisons et de la position au sein de la Niaye. Celles-ci impactent sur la chimie des eaux interstitielles et les différents processus de transferts hydriques et géochimiques le long des ZNS de chaque zone humide. Les Niayes de Lompoul et Potou présentent une minéralisation plus importante par rapport à celle de Mboro. Les eaux interstitielles des stations versant sont plus minéralisées que les stations centre davantage en surface qu'en profondeur. En saison sèche, les eaux interstitielles de la Niaye de Lompoul présentent les concentrations les plus importantes en éléments chimiques alors qu'en saison humide ce sont celles de Potou. Cependant, les eaux interstitielles de Mboro sont les moins minéralisées quelle que soit la saison avec des teneurs plus importantes en saison sèche qu'en saison humide. Aussi, la charge organique dissoute enregistre les plus forts taux dans les stations centre de Lompoul et versant de Potou.

Par ailleurs, une corrélation entre l'infiltration des solutés et la recharge de la nappe a été mise en évidence. En effet, un gradient décroissant du niveau de la nappe du secteur Sud vers le Nord de la bande côtière des Niayes (cf Partie III) montre un signal d'entrée des eaux d'infiltration de la nappe à Potou en saison humide, et une recharge plus retardée en saison sèche à Lompoul et Mboro. Ceci peut s'expliquer par les faciès sédimentologiques sableux devenant de plus en plus sablo-silteux à silteux, la présence de minéraux argileux, les processus de dissolution, d'oxydo-réduction et de réactions biogéochimiques, la présence de matière organique particulaire plus ou moins dégradée le long de la ZNS qui vont contribuer à minéraliser les eaux interstitielles et par conséquent per-descendum les eaux de la nappe. Toutefois, les eaux interstitielles sont donc plus chargées que les eaux de la nappe car les sédiments fins jouent un rôle de piège de solutés.

De plus, la composition isotopique des eaux interstitielles est influencée par les variabilités spatio-temporelles de pluviométrie et de température. En effet, le secteur Nord de Potou présente les eaux interstitielles les moins évaporées alors que le secteur centre de Lompoul enregistre les eaux interstitielles plus évaporées en saison sèche. En saison humide, les eaux sont plutôt moins enrichies à Lompoul et plus enrichies à Potou et Mboro. La qualité des eaux interstitielles le long de la ZNS au niveau des trois Niayes indique donc que l'infiltration des eaux ne se fait pas au même rythme. Elle dépend des conditions de pluviométrie, température et de densité du couvert végétal. La signature isotopique des eaux met en évidence l'impact de l'arrivée de la pluie en fonction de la lithologie des sols et de l'épaisseur de la ZNS. Ces zones

**PARTIE IV : FONCTIONNEMENT HYDRO-GEOCHIMIQUE ET SEDIMENTAIRE DE
L'ECOSYSTEME DES NIAYES SUR LE LITTORAL NORD**

humides présentent ainsi un fonctionnement hydrogéochimique différent avec des variabilités spatio-temporelles à l'échelle locale et régionale du Littoral le long de la ZNS. Ces particularités se retrouvent aussi au niveau des eaux souterraines du Littoral Nord aujourd'hui très vulnérables aux différentes sources de pollution.

Chapitre XII : Etude des processus de dégradation et origine de la matière organique : Application à la Niaye de Mboro

Le site de Mboro est localisé dans la zone Sud de la côte Nord, soumise un climat soudano-sahélien (Figure 75). Cette ville est très attractive du fait des différentes activités de maraîchage, de pêche, d'exploitation minière et tourisme qui induisent une croissance socio-économique importante. La Niaye de Mboro est un ancien cours d'eau qui a été isolé de l'océan au cours des deux derniers millénaires par l'avancée des dunes littorales (Michel, 1973). A côté du grand chenal perpendiculaire à la côte existent plusieurs dépressions isolées de tailles variables de 1 à 5 ha en moyenne. Ces unités occupent les points bas des dépressions où la nature du substrat sablo-argileux peut favoriser un piégeage local et temporaire de la nappe en surface (BRGM, 1984). Des travaux précédents ont montré la persistance des sols à hydromorphie partielle avec ou sans salure en relation avec l'impact de la variabilité climatique qui influence la diminution du niveau de la nappe. Au début des années 1950, la majeure partie de la Niaye de Mboro était couverte par des mares et des sols à hydromorphie totale. Par la suite, on note une diminution progressive du plan d'eau de 1954 à 2000 (Aguiar, 2009). Des investigations menées sur les environnements sédimentaires et de tourbières entre Mboro et Diogo du Quaternaire récent (Fall, 1986) ont permis la restitution des paléoenvironnements des Niayes de la fin du Pleistocène à l'Actuel. Une autre étude sur la dynamique de la végétation au Sénégal (Faye et *al.*, 2014) a permis de connaître la flore et de la végétation des zones agro-écologiques et de montrer l'évolution régressive de ces formations végétales de 1940 à nos jours.

Actuellement, cette zone humide, caractérisée par des sols humifères est constituée de cuvettes peu profondes avec une nappe affleurante à sub-affleurante. Elle présente une végétation luxuriante et des sols très fertiles permettant aux populations de pratiquer l'activité agricole.

L'objectif de ce chapitre est l'étude détaillée de la Niaye de Mboro, zone humide enrichie en matière organique à hydromorphie quasi-permanente afin de comprendre son fonctionnement sédimentaire et hydrogéochimique.

Ce chapitre est structuré en huit sous-chapitres dans lesquels seront présentés successivement les caractéristiques des sédiments et des eaux de cette zone humide. Nous ferons une étude à petite échelle en échantillonnant trois stations versant – centre – bas-fond de la Niaye (Figure 75) afin de déterminer les faciès sédimentaires et géochimiques, les paramètres physico-chimiques (redox, pH, T°), la teneur en eau des sols, la quantité et la qualité de la matière

PARTIE IV : FONCTIONNEMENT HYDRO-GEOCHIMIQUE ET SEDIMENTAIRE DE
L'ECOSYSTEME DES NIAYES SUR LE LITTORAL NORD

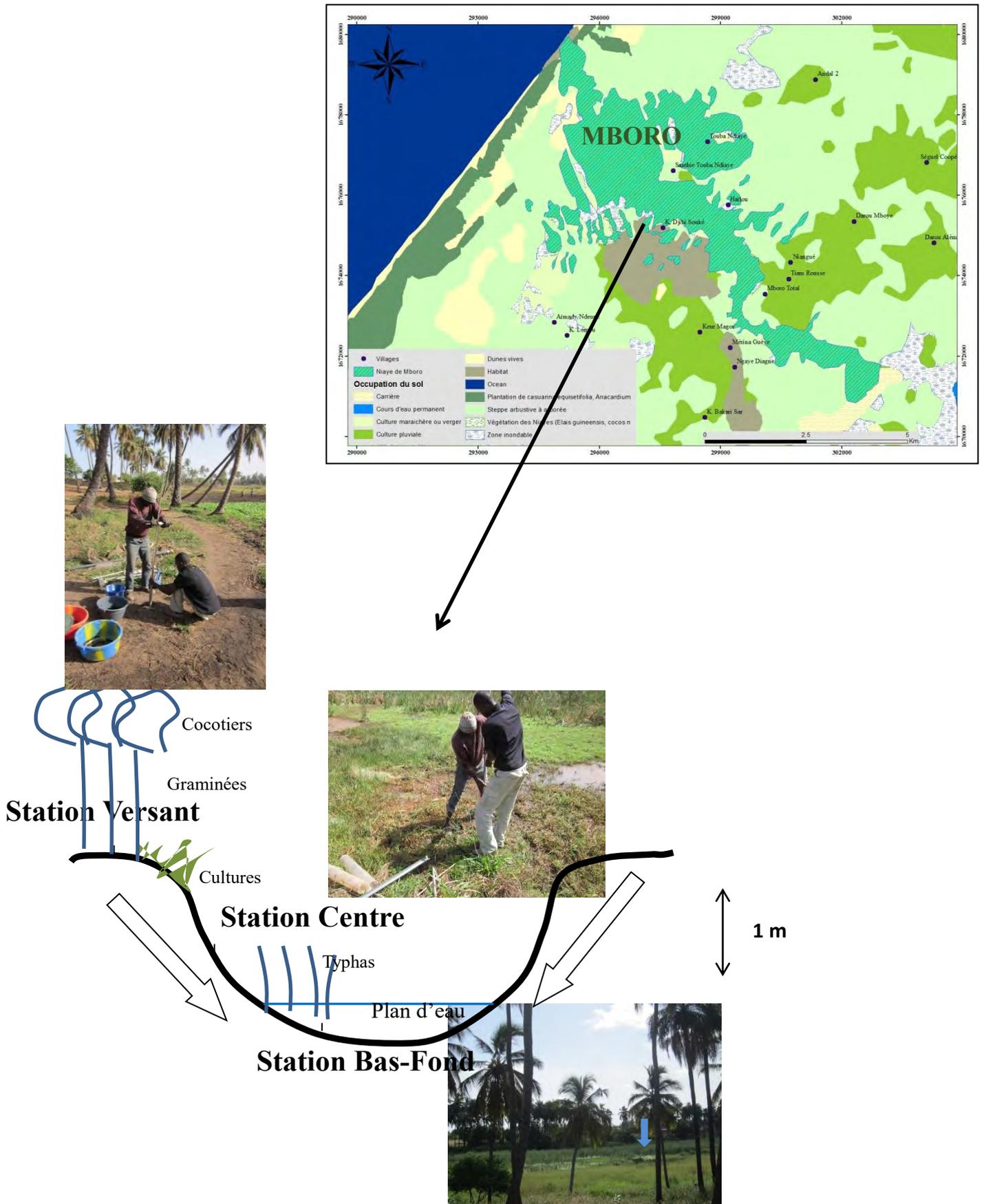


Figure 75 : Localisation de la Niaye de Mboro et des trois stations d'échantillonnage versant – centre – bas-fond de la Niaye de Mboro

organique ainsi que son origine et les processus de sa dégradation, la chimie des eaux interstitielles et du Carbone Organique Dissous, la quantification des flux de nutriments à l'interface eau-sédiment, la chimie du Phosphore et du Fer, et les formes de Phosphore dans les sédiments et la géochimie isotopique des eaux et des sédiments. Cette partie permettra donc d'apporter des arguments à la discussion générale sur la variabilité spatio-temporelle du fonctionnement sédimentaire et hydrogéochimique dans les Niayes. Déterminer si de nouveaux paramètres comme la chimie du phosphore particulaire et la géochimie isotopique des sédiments donneront d'autres arguments pour discuter la typologie des trois sites pilotes et précisément la Niaye de Mboro.

XII.1. Etude sédimentologique et géochimique

La Niaye de Mboro est une zone humide très fertile constituée de sols riches en humus, une marre d'eau permanente au centre de la dépression. Cette étude mettra l'accent sur les particularités sédimentologiques et géochimiques dans le contexte pédologique et hydroclimatique actuel et à fine échelle.

Les sédiments des stations versant, centre et bas-fond dans la Niaye de Mboro en saison humide (Octobre) montre des teneurs en argiles plus élevées en surface qu'en profondeur, et beaucoup plus sur le versant et le centre que dans le bas-fond de la Niaye. Ils présentent trois pôles caractéristiques silteux, sablo-silteux à silto-sableux et sableux (Figure 76-A).

La distribution granulométrique des sédiments en fonction de la profondeur se fait selon un gradient décroissant des particules fines vers les particules grossières, de la partie versant vers le bas-fond de la Niaye. Cette répartition présente en surface 26, 22, 15 % d'argiles; 60, 60 et 44 % de silts; 15, 19 et 39 % de sables respectivement sur le versant, la partie centre et le bas-fond de la Niaye. En profondeur, 3, 2 et 3 % d'argiles ; 36, 29 et 28 % de silts; 58, 63 et 64 % de sables respectivement au niveau des stations versant (MB1), centre (MB2) et bas-fond (MB3) (Figures 77-78-79). Ainsi, les sables très fins à fins sont dominants associés à des particules plus silteuses retrouvées plus dans les stations versant et centre que dans la station bas-fond.

Les résultats de la granulométrie confirment ceux de la saison sèche (cf Figure 52). Cependant, cette répartition ne met pas en évidence les profondeurs caractéristiques en saison sèche de 25-50 cm dans la partie centre et de 50-75 cm sur le versant avec plus de 90 % de silts et argiles. Elle présente en saison humide moins de 50 % de particules fines.

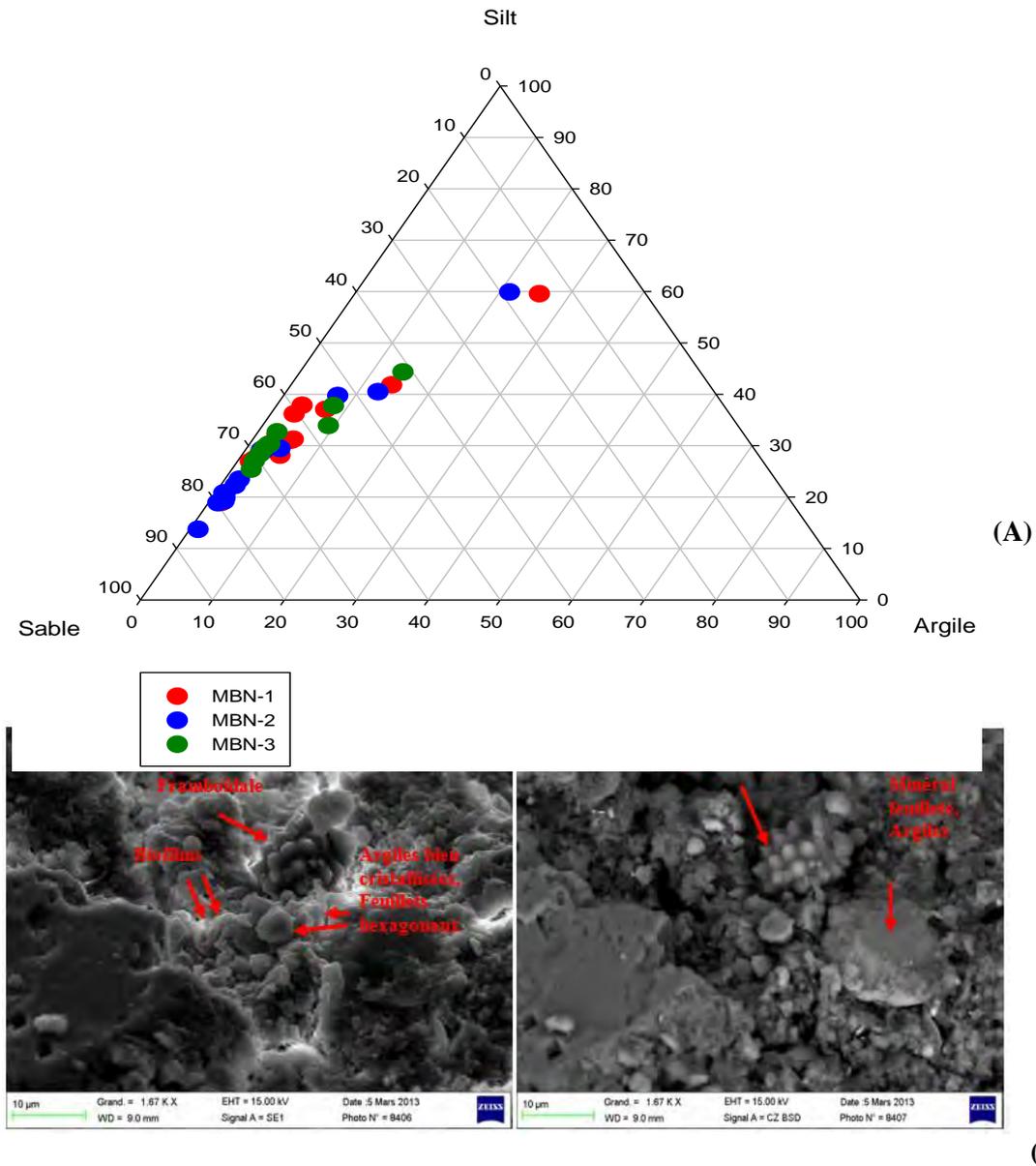


Figure 76 : (A) Diagramme ternaire de la granulométrie des sédiments dans la Niaye de Mboro sur un transect Versant (MB1) - Centre (MB2) – Bas-Fond (MB3) (Octobre 2013)
(B) : Observation des échantillons de Mboro au Microscopie à balayage notifiant la présence de Pyrite (FeS)

En effet, en saison humide, les particules fines en suspension peuvent se décanter et se déposer de façon aléatoire entraînant un dépôt plus important sur le versant et au centre que dans le bas-fond de la Niaye. Ce phénomène va à l'encontre du phénomène normal où les particules fines se déposent au fond des dépressions et les plus grossières se localisent dans la partie haute du versant. Ceci peut se justifier par les hauteurs de précipitations (535 mm en 2012 cf Partie III Ch VI) qui ont inondé les dépressions entraînant la mobilité et le dépôt hétérogène des particules.

De plus, l'analyse des sédiments de Mboro par observation au Microscope à Balayage met en évidence la présence de Pyrite framboïdale de formule (FeS) qui va contribuer à la minéralisation de la matière organique et à l'acidification du milieu (Figure 76-B). La pyrite est ainsi un indicateur de milieu acide comme le confirme les travaux de Le Brusq *et al.*, (2010), Sakho *et al.*, (2011). Ceci sera confirmé dans la suite de ce chapitre sur les profils de pH dans les sédiments.

A Mboro, les minéraux argileux sont moins diversifiés avec une dominance de la Kaolinite (cf Figure 54) représentant le stade ultime de la dégradation de la MO. Elle est souvent associée à de l'illite et des interstratifiés principalement en surface des profils de ZNS. Cependant, il a été noté une diversification des minéraux argileux (Kaolinite, Illite, Vermiculite, smectite, interstratifiés et palygorskite) ainsi que d'autres minéraux avec le quartz dominant dans les environnements sableux auxquels peuvent s'associer la goethite, sidérite, pyrite et jarosite (Fall, 1986).

XII.2. Paramètres physico-chimiques

La variabilité des conditions d'oxydo-réduction des sédiments de Mboro est mise en évidence par les Figures 77-78-79. En effet, le milieu réducteur en surface dans les premiers centimètres des profils dans la zone versant (MB1), puis à partir de -40 cm de profondeur. Ensuite les sédiments sont oxydés avec des valeurs de redox positives variant de 200 à 400 mV de -10 à -40 cm de profondeur. Le pH se stabilise à 3,7 dans la partie argilo-silteuse et tourbeuse de 0 à -30 cm dans un milieu oxydant. En profondeur, le pH devient moins acide autour de 5,6 dans un milieu réducteur silto-sableux. De -30 cm à la zone capillaire le pH augmente pour atteindre 5 dans les formations plus sableuses (Figure 77).

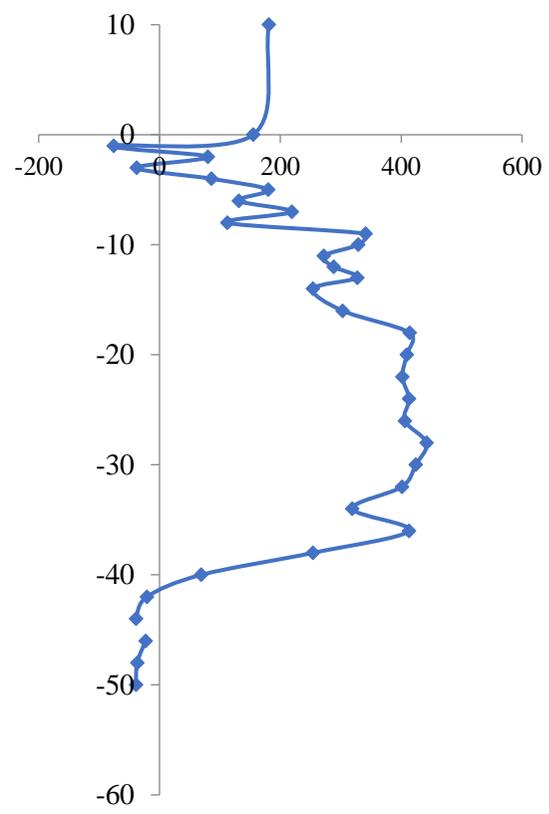
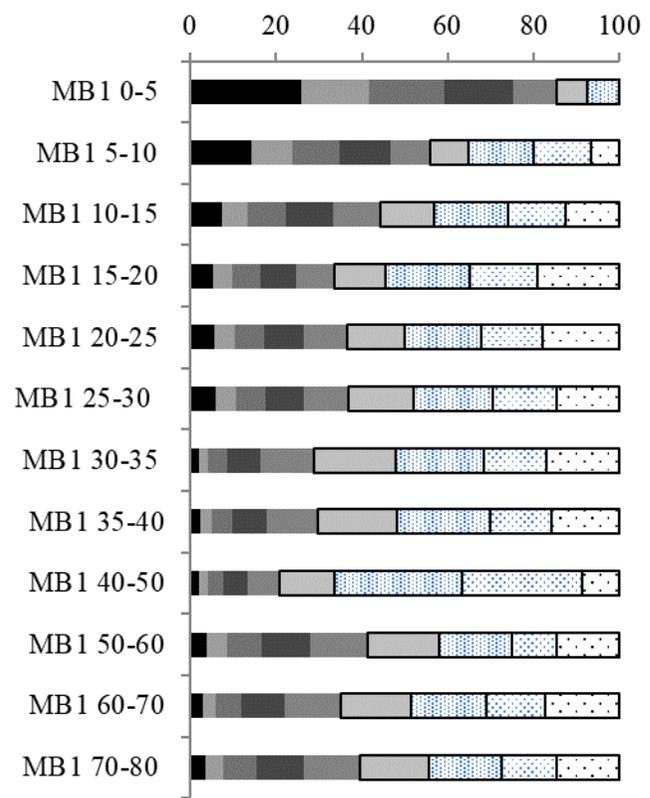
Dans la zone centre (MB2), la variation du pH marque un gradient croissant de 4 à 5 jusqu'à -25 cm dans la partie sablo-silteuse puis elle tend à se stabiliser en profondeur à partir de -40 quand le milieu devient réducteur et à faciès silto-sableux (Figure 78).

Dans la station bas-fond (MB3), les profils d'oxydo-réduction et du pH présentent une variabilité similaire avec une diminution de 0 à -10 cm puis une augmentation de -10 à -30 cm. La station bas-fond présente la zone la plus réductrice avec un pic atteignant -114 mV -6 cm. Le pH, en moyenne autour de 5, diminue en milieu réducteur (de 0 à -8 cm puis à partir de -30 cm) puis se stabilise en profondeur. Les sols argilo-silto sableux et tourbeux de 0 à -25 cm deviennent plus sableux en fonction de la profondeur de -25 à 55 cm (Figure 79).

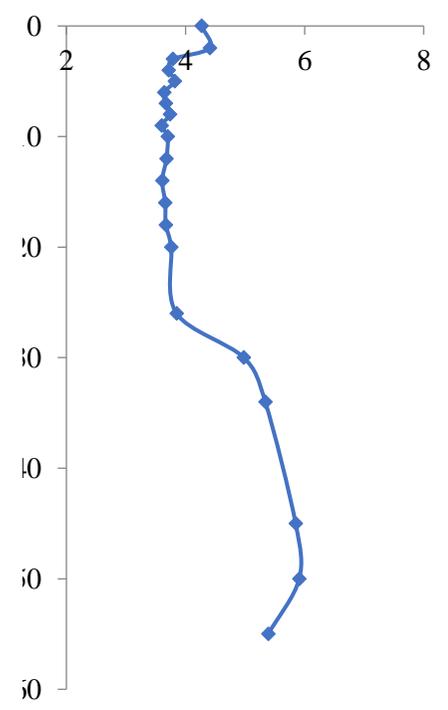
Dans la Niaye de Mboro, le milieu est généralement réducteur en surface et à partir de -30 cm. Le pH dans l'ensemble de la Niaye reste acide avec une valeur moyenne de 5 au niveau des trois stations.

Eh (mV)_MB 1

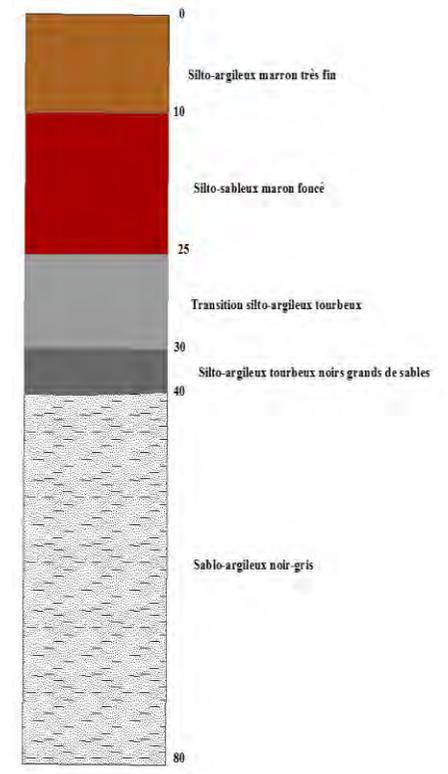
Granulométrie (%)



pH



Log



- Argile
- Silt très fin
- Silt fin
- Silt moyen
- Silt grossier
- Sable très fin
- Sable fin
- Sable moyen
- Sable grossier

Figure 77 : Caractérisation sédimentologique et physico-chimique de versant de la Niaye de Mboro

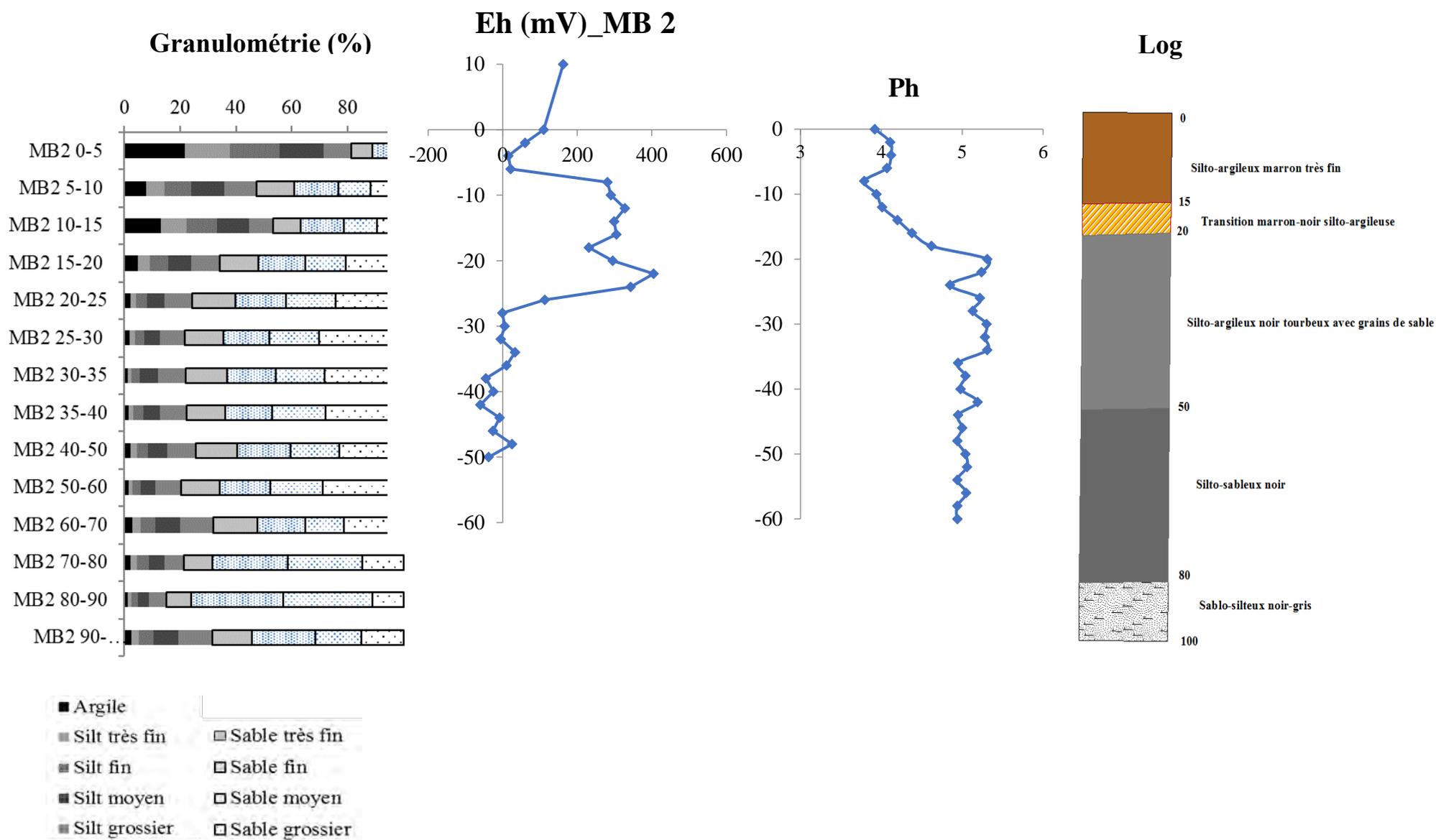


Figure 78 : Caractérisation sédimentologique et physico-chimique de la zone centre de la Niaye de Mboro

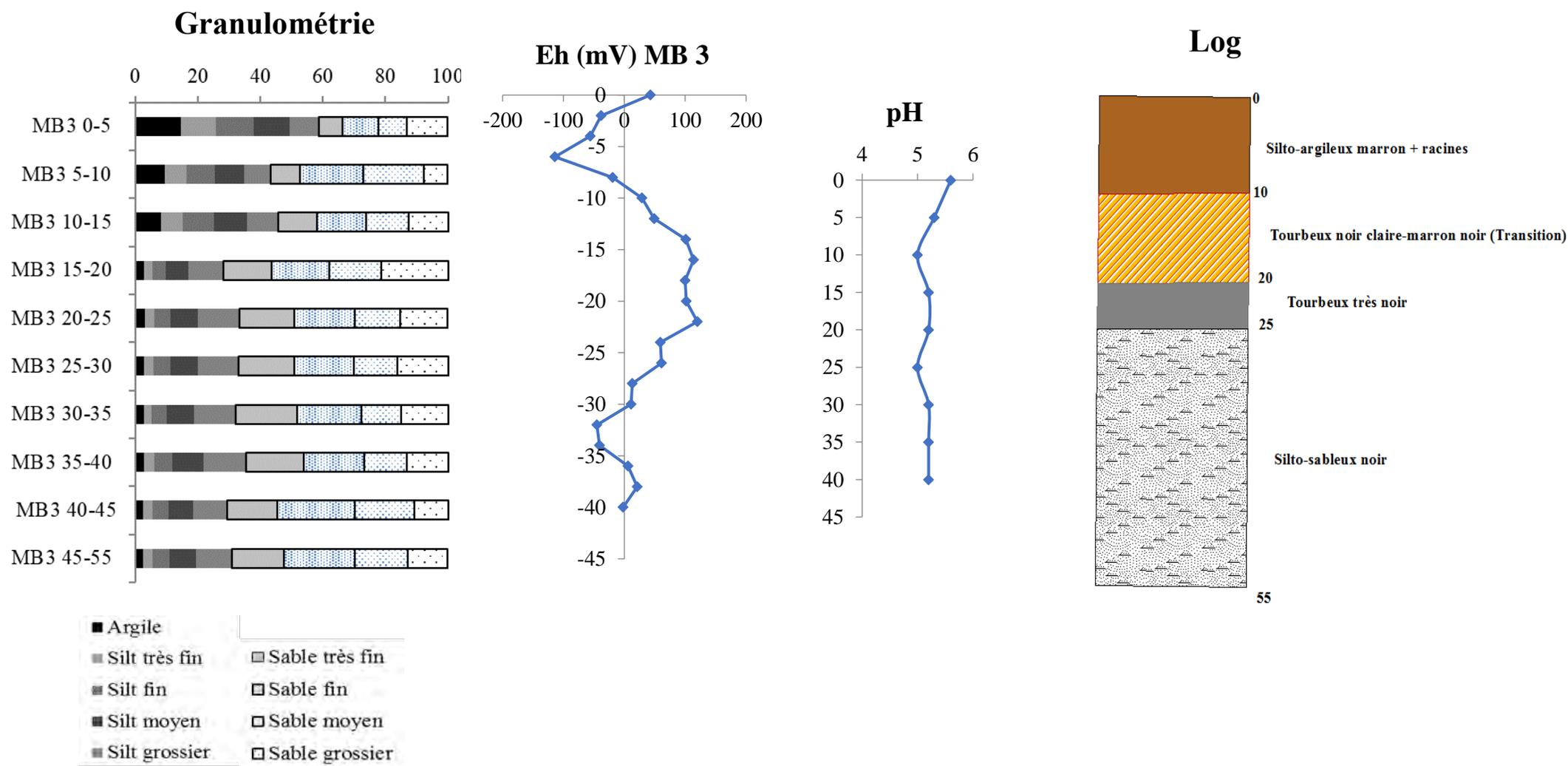


Figure 79 : Caractérisation sédimentologique et physico-chimique de la zone Bas-fond de la Niaye de Mboro

Ce pH est plus acide dans la station versant que dans les stations centre et bas-fond beaucoup plus en surface qu'en profondeur.

Les profils de ZNS mettent en évidence une variabilité de la frange capillaire qui se trouve à - 80, - 100 et - 55 cm respectivement dans les stations versant, centre et bas-fond. Les logs descriptifs montrent une zone de transition franche très tourbeuse de -15 à -20 cm dans la station centre et de - 10 à - 25 cm dans le bas-fond de la Niaye alors que le profil versant présente une texture plus diversifiée. En effet, ce dernier se distingue des deux autres profils de la ZNS par des horizons généralement argilo-silteux et tourbeux ayant des textures et couleurs différentes de -10 à - 40 cm devenant plus silto-sableux en profondeur. Les profils de la ZNS présentent des sols tourbeux de -15 à -80 cm et de 0 à -55 cm devenant plus sableux avec la profondeur respectivement dans les stations centre et bas-fond. Cette première analyse visuelle permet de conclure que les sols sont en surface argilo-silteux, suivi d'une phase de transition tourbeuse et enfin silto-sableux en profondeur.

La plus importante épaisseur de tourbes se situe entre 15 et 80 cm au niveau de la station centre. Cette tourbe renferme plus de 50 à 90 % de matière organique (Fall, 1986) à l'état dégradée.

XII.3. Teneur en eau des sédiments

La variation de la teneur en eau dans les sédiments de la ZNS montre en surface des sols peu humides et très humides en profondeur. En effet, ces valeurs sont de 28 à 51 %, de 39 à 50 % et 43 à 62 % de la surface à la frange capillaire respectivement aux stations MB1, MB2 et MB3 (Figure 80). Les maximas de teneur en eau sont enregistrés à -20 cm avec 91 et 88 % respectivement à MB2 et MB3. Pour MB1, le maximum d'eau se localise plus en profondeur à - 30 cm avec 81 % et les teneurs moyennes respectives de 62, 69 et 68 %. Une zone de stockage d'eau se distingue dans les niveaux tourbeux de -15 à -50 cm dans la Niaye de Mboro avec des teneurs supérieures à 60 %.

La forte capacité de rétention d'eau des sédiments de la Niaye de Mboro atteignant plus de 80% dans la zone de stockage pourrait être dû à la présence de tourbes visible sur les logs entre -10 et -50 cm de profondeur pour les trois profils de la ZNS (Figures 77-78-79). Ces tourbes sont rencontrées principalement sous trois formes (Fall, 1986) : (i) une tourbe franche très peu humifiée de couleur brune avec des restes végétaux bien conservés, cette forme a été identifiée dans les parties superficielles ; (ii) une tourbe humifiée de couleur brune ou noire à tissus végétaux partiellement gélifiés; (iii) une tourbe plus ou moins humifiée, noire avec micro-débris carbonisés ou pyrofusinites. Ces deux dernières formes sont identifiées en profondeur

généralement en fonction de l'humidité des sédiments et du degré de dégradation de la matière organique.

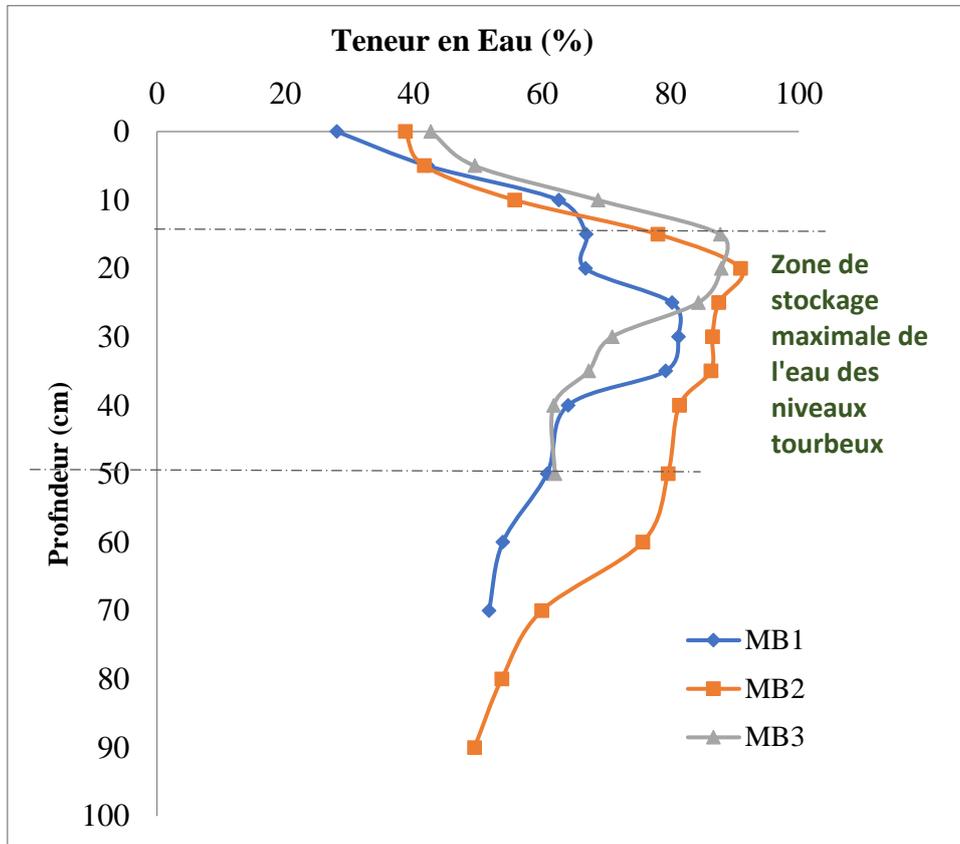


Figure 80 : Variabilité de la teneur en eau en fonction de la profondeur dans la Niaye de Mboro sur un transect Versant (MB1) - Centre (MB2) – Bas-fond (MB3) (Octobre 2013)

XII.4. Caractérisation de la Matière Organique

XII.4.1. Evaluation quantitative de la MO

La teneur en carbone est très variable en fonction de la position dans la Niaye et le long de la ZNS. L'analyse des résultats de la Pyrolyse Rock-Eval montre qu'en surface, les stocks de carbone varient entre 7, 9 et 15 %; et en profondeur de 6, 5 et 9 % respectivement pour les stations MB1 (versant), MB2 (centre) et MB3 (bas-fond) (Figure 81). Cette zone humide renferme une tranche de sol de – 20 à – 60 cm qui regorge plus de 30 % de Carbone Organique Particulaire (COP) principalement dans la station centre de la Niaye. La zone de Mboro présente donc un

stock moyen de COP de 18 % avec particulièrement 16, 21 et 17 % respectivement sur le versant, la zone centrale et le bas fond de la Niaye.

Les concentrations de COP les plus faibles se localisent sur le versant, suivi de la zone bas-Fond pour être maximale dans la partie centrale. Dans les 35 premiers centimètres des trois profils, il est noté une forte variation du stock de COP témoignant d'une variabilité du milieu et/ou une alternance de dépôts plus ou moins riches en substances organiques.

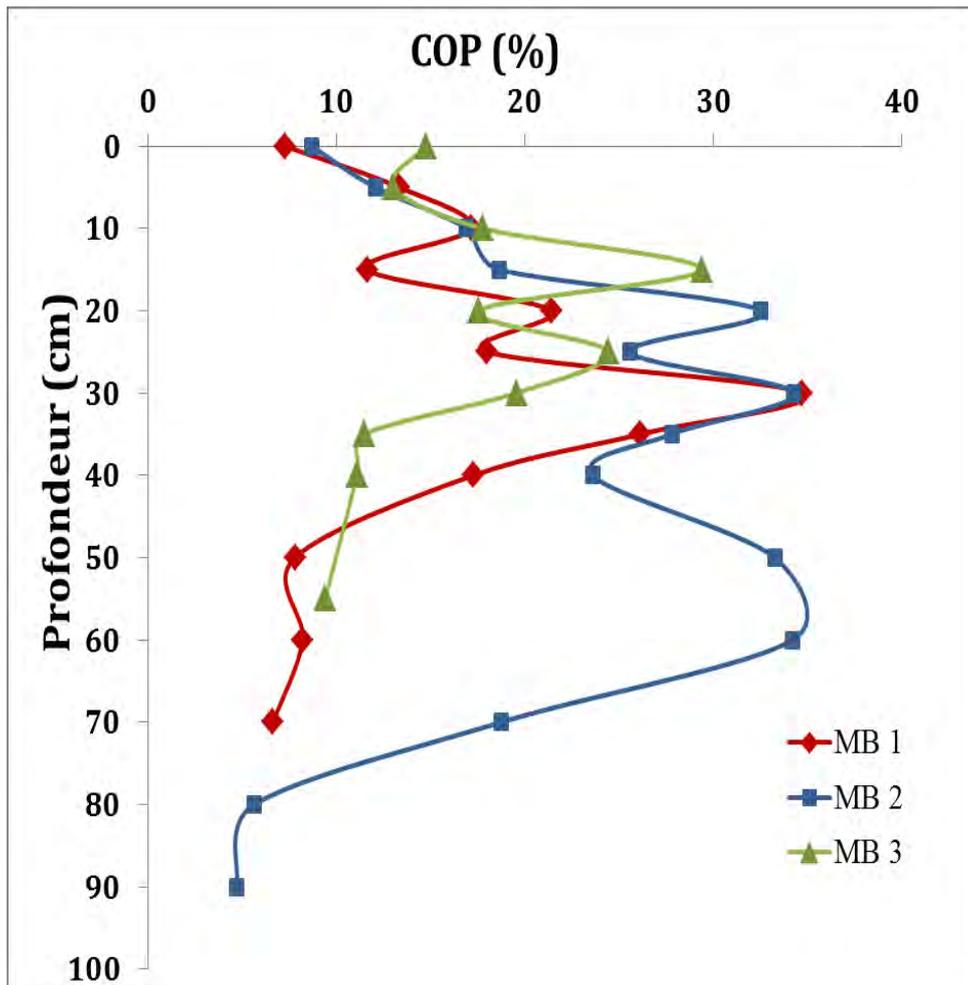


Figure 81 : Variabilité du Carbone Organique Particulaire (COP) dans la zone non saturée des stations MB1, MB2 et MB3 en fin saison humide (Octobre 2013)

XII.4.2. Evaluation qualitative de la MO

L'évaluation qualitative de la MO des sédiments de Mboro a été déterminée par les indices IH, IO et TpeakS2 obtenus par Pyrolyse Rock-Eval.

**PARTIE IV : FONCTIONNEMENT HYDRO-GEOCHIMIQUE ET SEDIMENTAIRE DE
L'ECOSYSTEME DES NIAYES SUR LE LITTORAL NORD**

La variation de l'indice Hydrogène (IH) en fonction de la profondeur montre une diminution progressive des teneurs en Hydrocarbures et une allure assez constante du profil ZNS sur le versant (MB1). Ce profil enregistre un maximum d'IH en surface de 273 mg HC/g COT et un minimum au niveau de la frange capillaire 217 mg HC/g COT avec en moyenne 265 mg HC/g COT (Figure 82-A). Les profils ZNS MB2 et MB3 présentent la même allure avec des taux plus élevés en surface à MB3 et le long du profil ZNS à MB2.

Cette analyse met en évidence deux pics de concentrations caractéristiques dans la station centre de 400 et 338 mg HC/ g COT respectivement aux profondeurs - 25 et - 35 cm.

Le profil MB3 enregistre à ces mêmes profondeurs des pics de 342 et 287 mg HC/ g COT respectivement. Les valeurs moyennes d'IH sont de 284 et 274 mg HC/ g COT respectivement dans les stations centre et bas-fond de la Niaye de Mboro.

Ainsi, les stations centre et bas-fond enregistrent des teneurs très variables en IH le long de la ZNS par rapport au versant où les valeurs diminuent avec la profondeur. En effet, la surface de la station bas-fond et toute la ZNS de la station centre sont les plus enrichies en substances organiques hydrocarbonées.

L'Indice d'Oxygène (IO) montre un profil de concentration décroissant en fonction de la profondeur sur les trois stations de la Niaye. Il enregistre en surface des valeurs de 156, 155 et 166 mg CO₂/ g COT et au niveau la zone capillaire des taux de 77, 91 et 96 mg CO₂/ g COT avec en moyenne 156, 133 et 125 mg CO₂/ g COT respectivement dans les zones versant, centre et bas-fond de la Niaye de Mboro (Figure 82-B). Des pics de concentration d'IO de 196 et 185 mg CO₂/ g COT sont enregistrés respectivement à -25 et -40 cm sur le profil MB2. Le profil de MB3 dans la zone bas fond montre un pic de 166 mg CO₂/ g COT à -25 cm de même tendance que MB2 avant prendre une allure similaire à celle du profil MB1 (Figure 82-B). Ainsi, la Niaye de Mboro présente sur son versant une variabilité similaire autant pour l'IH que l'IO. Cependant, les stations centre et bas-fond de la zone humide de Mboro mettent en exergue des variations semblables de l'IH et de l'IO de 0 à 40 cm de profondeur. Au delà de 40 cm de profondeur, ces teneurs varient de manière antagoniste avec une augmentation de l'IH et une diminution de l'IO tendant à se rapprocher des valeurs de la station versant.

Le pic de température de craquage des hydrocarbures du signal S2 (TPeakS2) des profils MB1, MB2 et MB3 varie entre un minimum de 384°C à - 60 cm et un maximum de 474°C à - 20 cm. Il présente des valeurs moyennes respectives de 451, 444 et 450°C respectivement sur le versant, centre et bas-fond de la Niaye. Ainsi, la matière organique à Mboro est mature et homogène en surface.

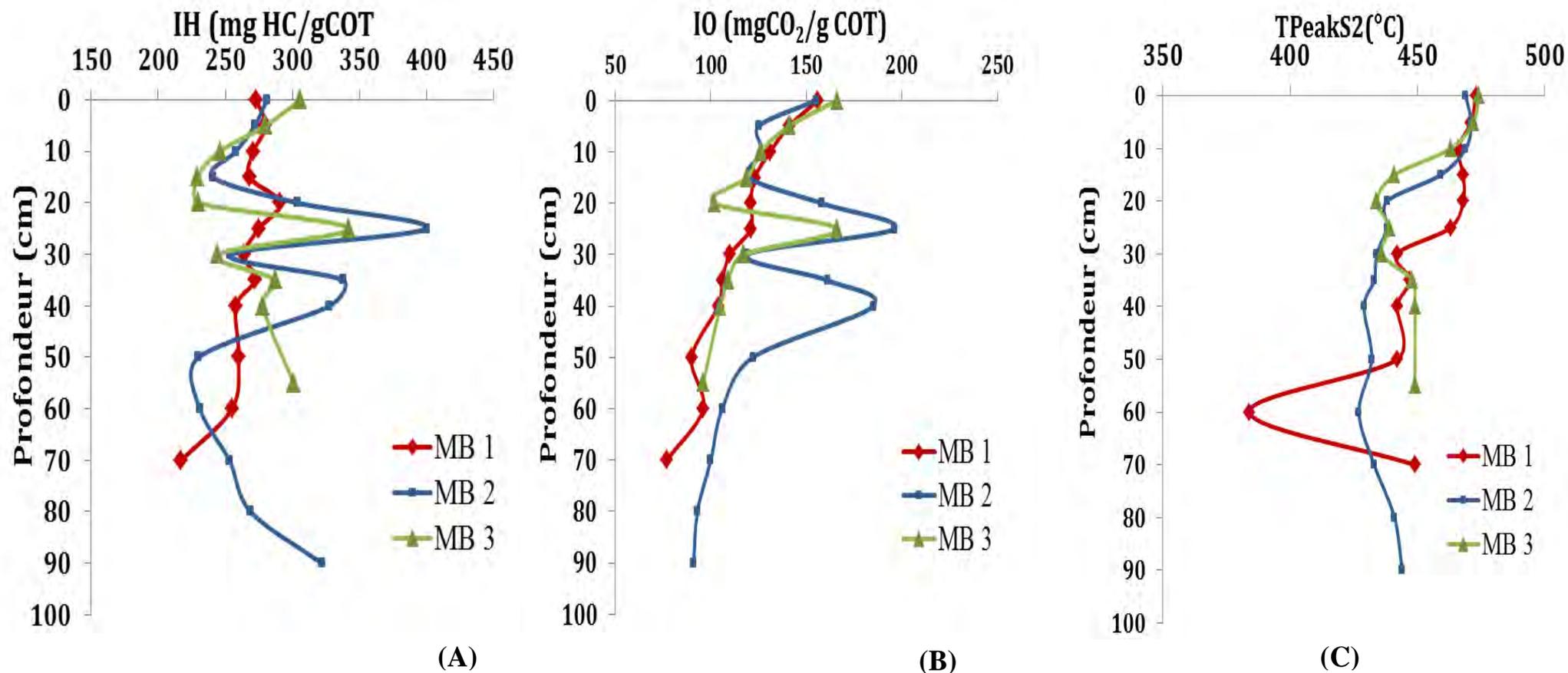


Figure 82 : Variabilité des paramètres qualitatifs de la matière organique en fonction de la profondeur IH (A), IO (B) et TpeakS2 (C) (Octobre 2013)

Elle devient immature et hétérogène le long de la ZNS avec des TpeakS2 inférieurs à 470°C et qui diminuent avec la profondeur (Figure 82-C). Le pic spécifique de 384°C à - 60 cm sur le versant peut traduire l'importance des processus d'oxydo-réduction en milieu réducteur telle que la sulfatogénèse qui agit activement sur la dégradation de la matière organique en profondeur grâce l'activité des bactéries sulfato-réductrices.

Ces résultats conduisent à comprendre les processus géochimiques mise en œuvre dans la Niaye de Mboro en fonction la position dans la dépression. En effet, sur le versant le processus de minéralisation de la MO est dominant sur tout le long du profil. Dans les parties centre et bas-fond, la matière organique se dégrade par minéralisation de 0 à -15 cm. De -15 à -40 cm, l'alternance de processus d'accumulation des substances organiques hydrocarbonées pouvant évoluer jusqu'au stade ultime à de tourbes en milieu humide faiblement oxygénée et une dégradation par processus biogéochimiques ou une minéralisation de la matière organique peuvent expliquer cette variation. Au delà de -40 cm, la MO se dégrade principalement par décomposition des dépôts organiques accumulés telle que la litière. Cette partie peut être considérée comme un puit de carbone qui peut évoluer en tourbière principalement dans la zone centre de la dépression de Mboro. Ces analyses en laboratoire confirment donc les résultats observés au niveau des logs stratigraphiques et précisent les processus géochimiques de cette zone humide.

XII.5. Chimie des Eaux interstitielles dans la Niaye de Mboro

XII.5.1. Les ions majeurs et le carbone organique dissous

L'analyse de la chimie des eaux interstitielles collectées en fin de saison humide (Octobre 2013) met en évidence un gradient croissant de concentration bas fond - centre - versant dans la zone humide de Mboro pour l'ensemble des éléments majeurs (Tableau 15 - Figure 83). La partie versant reste la plus minéralisée pour l'ensemble des éléments chimiques par rapport au centre et au bas-fond de la Niaye. En effet, les teneurs les plus importantes sont principalement les sulfates, le carbone organique dissous et l'ammonium avec respectivement 419, 52 et 4 mg/l (Tableau 15). Les teneurs en sulfate et chlorure présentent une grande variabilité avec un écart-type respectif de 215 et 129. L'ammonium et les bromures par contre enregistrent de valeurs d'écart type entre 0,9 et 0,1 attestant une variation faible des valeurs. Les teneurs en chlorures en fonction de la profondeur varient en surface de 1012, 568 et 484 mg/l et 210, 119 et 93 mg/l

**PARTIE IV : FONCTIONNEMENT HYDRO-GEOCHIMIQUE ET SEDIMENTAIRE DE
L'ECOSYSTEME DES NIAYES SUR LE LITTORAL NORD**

en profondeur avec en moyenne 426, 260 et 173 mg/l. Les valeurs de sodium présentent un maximum de 668, 409 et 313 mg/l, et un minimum de 152, 98 et 64 mg/l en profondeur avec en moyenne 288, 194 et 117 mg/l respectivement à MB1, MB2 et MB3 (Figure 83). Les teneurs en bicarbonates suivent la même tendance avec des valeurs moyennes de 557, 367 et 198 mg/l respectivement sur le versant, centre et bas-fond de la Niaye. Par ailleurs, les concentrations en nitrates sont presque nulles sur les profils centre, bas-fond et en surface du versant. Elles atteignent 104 mg/l essentiellement au niveau de la zone capillaire du versant.

La courbe de la variation du Carbone Organique Dissous (COD) présente une allure similaire. Elle enregistre des taux maximums de 708, 202 et 106 mg/l et minimums 12, 18 et 11 mg/l (Annexe IX) avec en moyenne de 85, 33 et 38 mg/l respectivement dans les stations versant (MB1), centre (MB2) et bas-fond (MB3) de la Niaye (cf Tableau 15). Ces fortes concentrations sur le versant peuvent provenir de la forte action anthropique avec l'utilisation des engrais et fertilisants en vue de l'amélioration du rendement agricole et dans une moindre mesure du retour à la nappe des eaux usées issues des rejets industriels et domestiques. Le processus de nitrification noté en profondeur peut être dû à l'action des micro-organismes dans la zone de battement de la nappe. Elle peut aussi provenir des résidus de plantes ou de l'azote atmosphérique qui s'infiltre dans les sédiments (Diedhiou, 2011, Tindall et al., 1995). Ces derniers seront soumis à des phénomènes d'ammonisation, de dénitrification, de nitrification, du lessivage des sols conduisant à produire des nitrates en profondeur.

Tableau 15 : Statistique descriptive de la chimie des eaux interstitielles au niveau des stations versant- centre-bas-fond de la Niaye de Mboro

Paramètres	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	COD
MB 1	426	629	557	1	11	288	5	59	123	36	85
MB 2	260	427	367	1	0	194	3	31	65	26	33
MB 3	173	200	198	1	0	116	4	12	30	13	38
Moyenne	286	419	374	1	4	199	4	34	73	25	52
Ecart-type	129	215	180	0	6	86	1	24	47	11	29

La station bas-fond est située dans la partie la plus humide et colonisée par des plantes hydromorphes généralement de type Typha. Cette zone possède un plan d'eau permanent qui fluctue en fonction des saisons. Elle est soumise à un phénomène de remontée de la nappe qui entraîne la dilution des eaux interstitielles. La station centre est soumise à l'influence des parties versant et bas-fond.

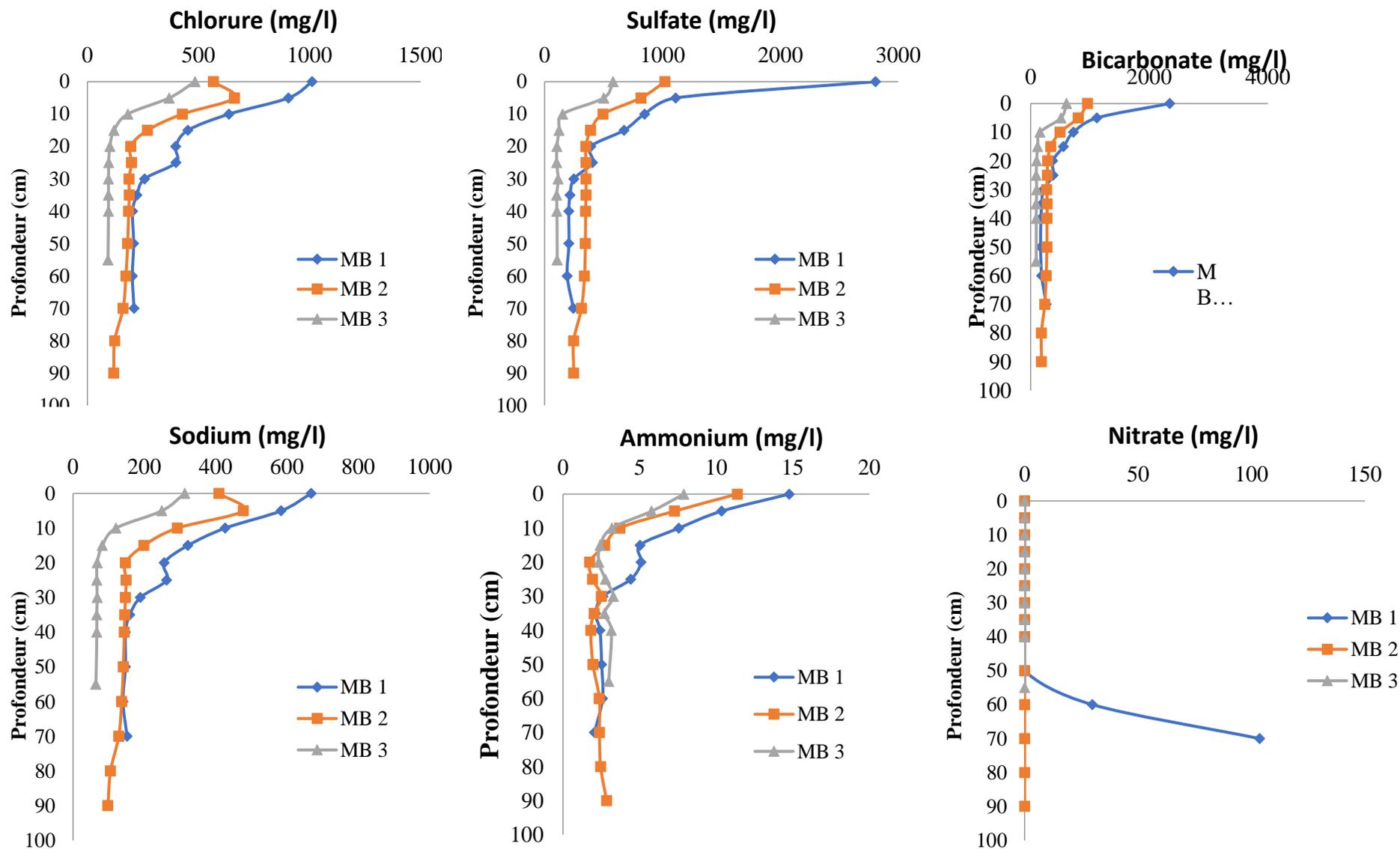


Figure 83 : Chimie des eaux interstitielles dans la Niaye de Mboro sur un transect Versant (MB1) - Centre (MB2) – Bas-Fond (MB3) en fin saison humide (Octobre 2013)

Ainsi, la chimie des eaux interstitielles est très hétérogène au niveau des trente premiers centimètres puis elle s'homogénéise en profondeur à l'exception des nitrates. La forte pression anthropique principalement l'agriculture dans la station versant peut expliquer les apports nutritifs et les fortes concentrations en éléments chimiques majeurs.

XII.5.2. Quantification des flux de nutriments (Phosphore, Ammonium) à l'interface eau-sédiment de la Niaye de Mboro

Les sédiments de Mboro présentent des flux de nutriments différents en fonction des apports et de la capacité de rétention d'eau et des solutés au sein de la Niaye et le long des profils. Les flux des ions PO_4^{3-} varient de 2,8 à 4,7 ; de 4 à 5,7 et de $8,6 \cdot 10^{-2}$ à $1,2 \cdot 10^{-1}$ mmol/m /j avec en moyenne 3,2 ; 4,9 et $8 \cdot 10^{-2}$ mmol/m /j respectivement sur le versant, le centre et le bas-fond de la Niaye (Tableau 16).

Les flux des ions NH_4^+ varient de $5 \cdot 10^{-4}$ à $1,8 \cdot 10^{-3}$, de $3,5 \cdot 10^{-4}$ à $1,8 \cdot 10^{-3}$ et $1 \cdot 10^{-3}$ à $2,4 \cdot 10^{-3}$ mmol/m /j avec en moyenne $8,2 \cdot 10^{-4}$, $9,4 \cdot 10^{-4}$ et $1,7 \cdot 10^{-3}$ mmol/m /j dans les profils respectifs de MB1, MB2 et MB3 de la Niaye de Mboro.

Ainsi, les flux d'échange du phosphore à l'interface eau-sédiment sont plus importants dans les stations centre et versant que dans la station bas-fond de la Niaye. Les plus fortes concentrations se localisent au centre du profil MB2 de -5 à -20 cm de profondeur. Par contre, les flux d'échange de l'ammonium sont plus élevés dans la station bas-fond de la dépression et principalement en surface.

Les flux de nutriments à l'interface eau-sédiment relativement forts pour les ions phosphates peuvent avoir une origine naturelle provenant d'une part de la roche encaissante et d'autre part des activités anthropiques. Ces flux sont relativement faibles pour les ions ammonium. Ces processus vont entraîner l'acidité du sédiment déjà démontré dans la caractérisation physico-chimique du milieu et la présence de Pyrite. De plus, l'absorption de l'ammonium s'accompagne d'une désorption d'ions H^+ qui entrainerait une acidification du milieu. A cela peut s'ajouter, un enrichissement des sols des cuvettes environnantes en acide phosphorique provenant des industries extractives (Khouma et *al.*, 2004).

Tableau 16 : Valeurs des flux de diffusion des nutriments PO₄³⁺ et NH₄⁻ dans la Niaye de Mboro sur un transect Versant (MB1) - Centre (MB2) – Bas-Fond (MB3) (Octobre 2013)

Echantillon	Porosité (φ)	Flux PO ₄ ³⁺ (mmol/m ² /j)	Flux NH ₄ ⁻ (mmol/m ² /j)
MB 1 0-5	0,5	2,8	1,9E-04
MB 1 5-10	0,7	4,4	1,8E-03
MB 1 10-15	0,8	3,2	1,0E-03
MB 1 15-20	0,9	4,3	7,8E-04
MB 1 20-25	0,9	4,7	5,0E-04
MB 1 25-30	0,9	3,2	6,9E-04
Moyenne	0,8	3,2	8,2E-04
MB 2 0-5	0,6	4,0	3,5E-04
MBN2 5-10	0,7	5,7	4,4E-04
MBN210-15	0,8	5,5	1,8E-03
MBN2 15-20	0,9	4,2	1,1E-03
MBN2 20-25	1,0	5,6	1,0E-03
MBN2 25-30	1,0	4,3	9,4E-04
Moyenne	0,8	4,9	9,4E-04
MBN3 0-5	0,7	5,1E-02	2,4E-03
MBN3 5-10	0,7	7,6E-02	1,5E-03
MBN310-15	0,9	1,2E-01	1,5E-03
MBN3 15-20	1,0	1,2E-01	2,1E-03
MBN3 20-25	1,0	8,6E-02	1,8E-03
MBN3 25-30	1,0	5,2E-02	1,0E-03
Moyenne	0,9	8,4E-02	1,7E-03

Ainsi, la dissolution des éléments chimiques dans les eaux interstitielles et la dégradation de la MO enfouie dans le sol vont contribuer à augmenter les flux de nutriments. Ces flux d'échange entre le sédiment et l'eau du sol se font en fonction de la teneur en eau des sédiments, de la demande des plantes, du type de sédiments et de plantes, et de la position de leurs racines dans le sol. Ces flux de nutriments importants en fonction de la position dans la dépression et l'importance de l'activité agricole jouent un rôle essentiel dans la nutrition des plantes. Plusieurs paramètres influencent l'échange des nutriments tels les facteurs environnementaux à l'interface eau-sédiment comme l'activité bactérienne (Gächter et Meyer, 1993), la chimie des hydroxydes de fer ou les conditions d'oxygénation (Maine et *al.*, 1992, De Montigny et *al.*, 1993), la minéralisation de la MO (Mesnage et *al.*, 2007). L'ensemble des processus physiques,

chimiques et biologiques (Reddy et DeLaune, 2008) et les diverses activités anthropiques (Nyenje et *al.*, 2013) influencent fortement la biodisponibilité et les échanges de nutriments à l'interface eau-sédiment dans les zones humides.

XII.6. Détermination de la chimie du Phosphore et Fer

Ce sous chapitre fait une analyse sur le phosphore particulaire total et le fer particulaire total dans les sédiments dans les 35 cm premiers des profils de chacune des trois stations à Mboro. Les teneurs en phosphore particulaire total sont du même ordre de grandeur en moyenne de 600 $\mu\text{gP/g}$ de sédiment dans les 5 premiers centimètres de sédiments, puis décroissent pour atteindre 100 $\mu\text{gP/g}$ de sédiment en profondeur. Ces concentrations variant de 651 à 140, 555 à 104 et 585 à 89 $\mu\text{g P/g}$ de sédiment sont enregistrés respectivement à MB1, MB2 et MB3 (Figure 84-A). A 10 cm de profondeur, les concentrations en phosphore total sont de l'ordre de 400 $\mu\text{g P/g}$. A - 15 cm particulièrement, une différence est observée entre les trois stations avec des sols les plus riches en phosphore particulaire dans la station versant vers les moins riches dans les stations centre et bas-fond de la Niaye.

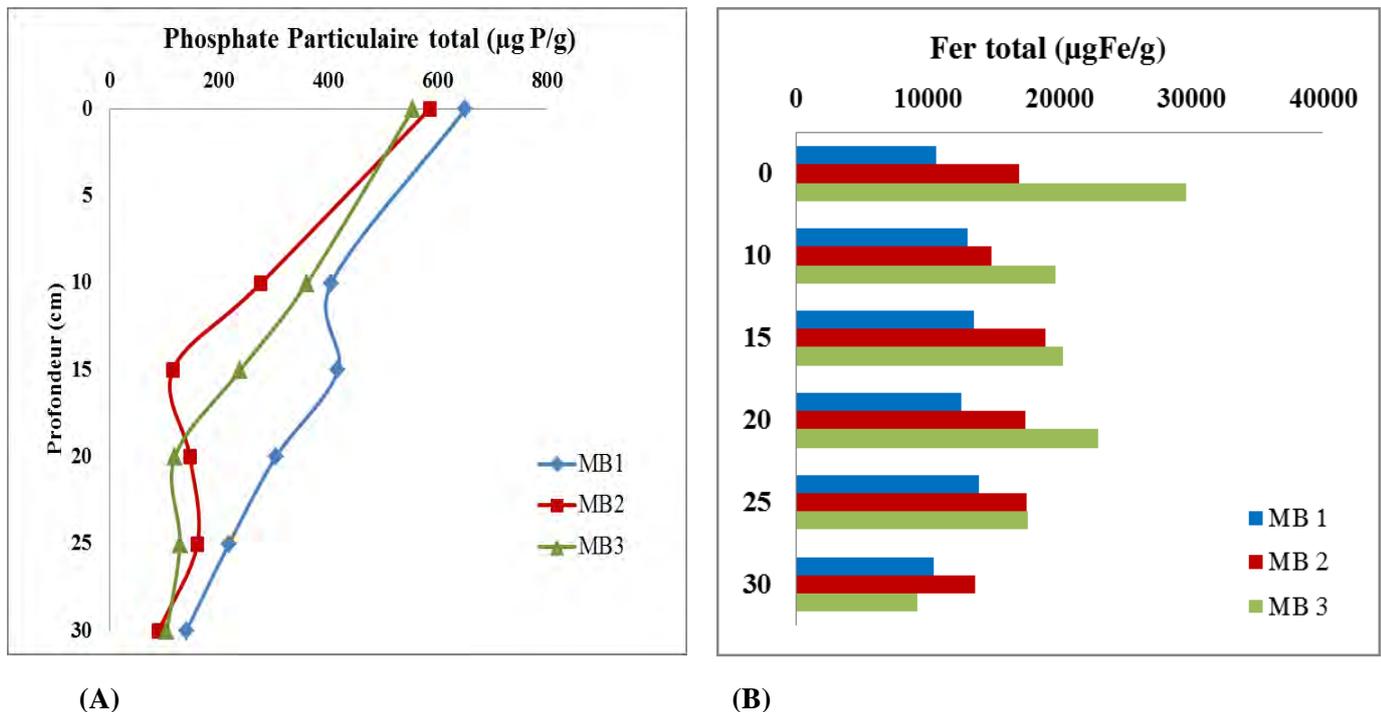


Figure 84 : Distribution du PO_4 total (A) et Fer total (B) dans la Niaye de Mboro sur un transect Versant (MB1) - Centre (MB2) – Bas-Fond (MB3) en fin de saison humide (Octobre 2013)

Par ailleurs, les teneurs en fer sont plus importantes dans le bas-fond, suivi de la station centre puis enfin du versant de la Niaye avec des valeurs respectives de 29 649 à 9176, 16 895 à

13 546, 10 605 à 13 547 $\mu\text{g Fe/g}$ de sédiment (Figure 84-B). Le Fer est un oxydant puissant qui intervient dans les réactions biogéochimiques. Il se fixe aussi majoritairement au complexe argilo-humique des sols. Ce fer peut provenir de la dissolution de la roche encaissante, le lessivage des sols, l'hydrolyse des minéraux argiles et les rejets industriels, agricoles et domestiques qui par ruissèlement peuvent se trouver majoritairement au fond des dépressions. Ainsi, les sols de la Niaye de Mboro présentent des teneurs de phosphore et fer totaux plus importantes en surface et diminuant en fonction de la profondeur. Toutefois, la station versant est la plus riche en phosphore alors la station bas-fond concentre plus de fer. Ceci peut être dû à la forte utilisation d'engrais pour améliorer les rendements agricoles sur le versant. Aussi, la station bas-fond par lessivage des sols et ruissèlement accumulent des éléments chimiques dans le fond de la dépression.

XII.7. La répartition des formes de Phosphore particulaire dans les sédiments

L'analyse de la répartition des formes de phosphores en fonction de la profondeur montre les teneurs en phosphore lié au fer plus importantes que celle lié au calcium ou à la matière organique. En surface, ces valeurs varient entre 485, 283 et 339 $\mu\text{g P/g}$ et en profondeur entre 95, 52 et 67 $\mu\text{g P/g}$ respectivement aux stations MB1, MB2 et MB3 (Figure 85). Le phosphore lié au calcium enregistre des taux de 168, 71 et 125 $\mu\text{g P/g}$ en surface ; et 41, 10 et 25 $\mu\text{g P/g}$ en profondeur respectivement dans le versant, le centre et le bas-fond de la Niaye. Le phosphore lié à la matière organique présente des valeurs entre 42, 270 et 176 $\mu\text{g P/g}$ en surface, et en profondeur 31, 45 et 27 $\mu\text{g P/g}$ respectivement sur MB1, MB2 et MB3 (Figure 85). La station versant est plus enrichie le long du profil que les deux autres stations. La partie minérale liée aux cations (Fe, Ca) est plus importante à celle liée à la matière organique avec 70 % de P-Fer en surface de la zone versant. Cependant, le phosphore lié à la matière organique est riche à des profondeurs spécifiques dans les stations centre et bas-fond. Ainsi, la station MB2 enregistre 51 % P-MO de 20 à 25 cm de profondeur. A -15 cm, la station MB3 présente 65 % de P-MO.

PARTIE IV : FONCTIONNEMENT HYDRO-GEOCHIMIQUE ET SEDIMENTAIRE DE
L'ECOSYSTEME DES NIAYES SUR LE LITTORAL NORD

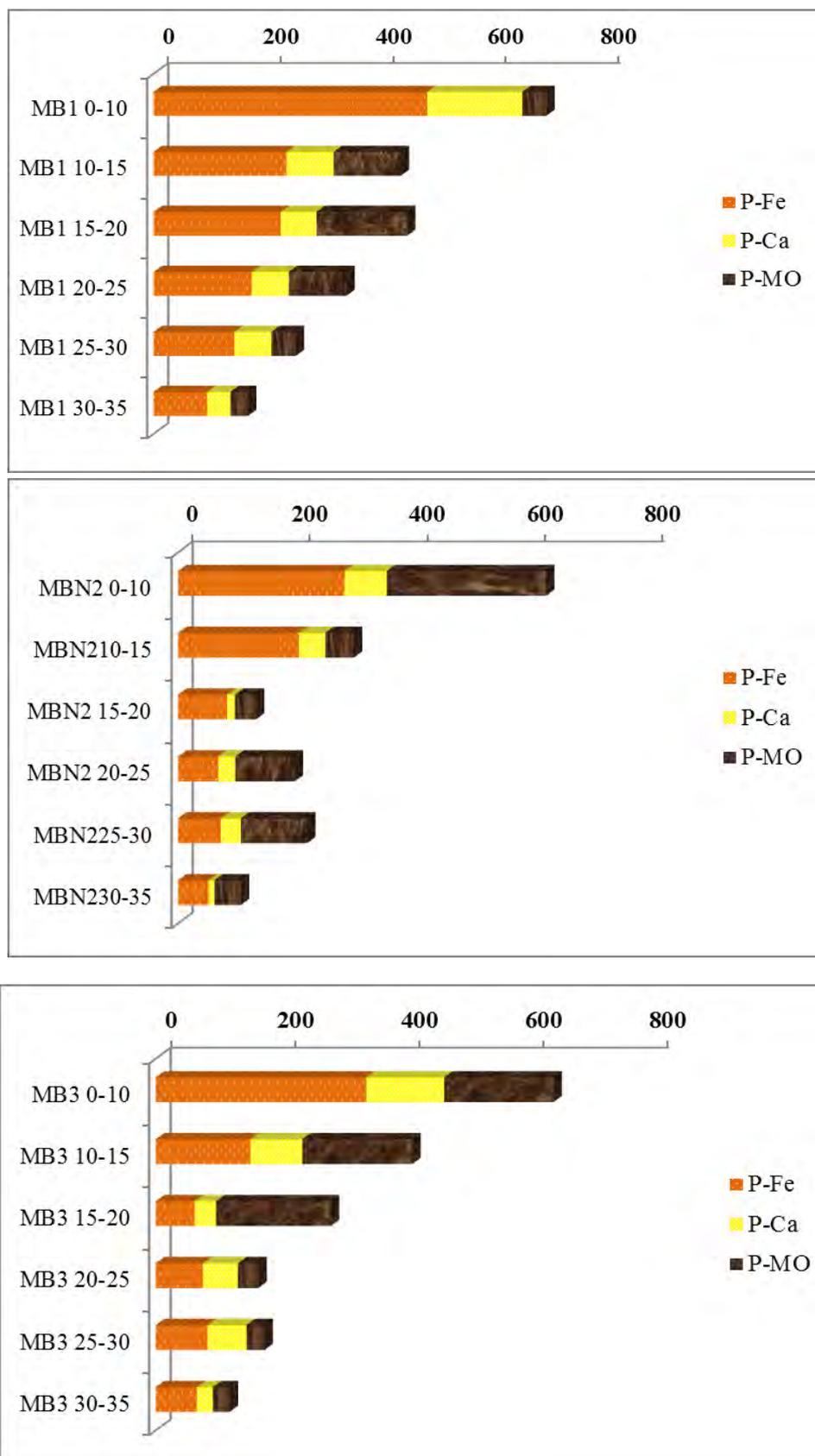


Figure 85 : Les formes de phosphore en ($\mu\text{g P/g}$) en fonction de la profondeur dans la Niaye de Mboro sur un transect Versant (MB1) - Centre (MB2) – Bas-Fond (MB3) en fin saison humide (Octobre 2013)

Ces fortes concentrations de phosphore lié à la MO peuvent se corrélérer à celles de la MO et des teneurs en eau dans la tranche de sol de -15 à -25 cm des stations centre et bas-fond de la Niaye (Cf XII-3 et XII-4).

Le fractionnement du phosphore dans les sédiments de la Niaye de Mboro montre donc des formes de phosphore liées majoritairement au fer sur le versant et du phosphore lié à la matière organique beaucoup plus dans le bas-fond et le centre de la dépression (Figure 86).

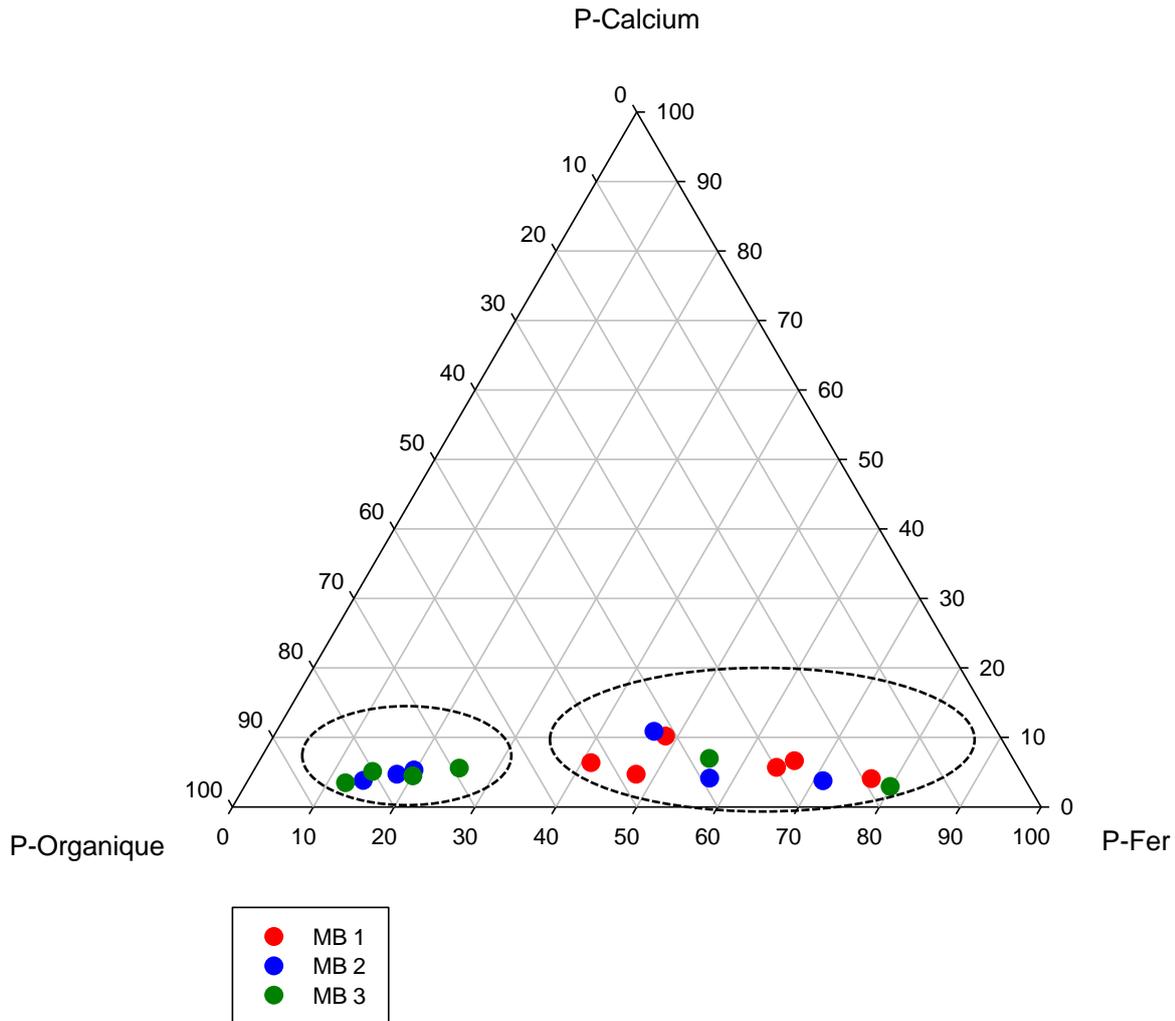


Figure 86 : Diagramme ternaire des formes de phosphore particulaire dans la Niaye de Mboro sur un transect Versant (MB1) - Centre (MB2) – Bas-Fond (MB3) (Octobre 2013)

Les parties supérieures des profils montrent donc un taux important du phosphore particulaire minéral (lié au Fer et Calcium) qui a été évalué à 94 % du phosphore particulaire total sur le versant. Les parties en surface du centre et bas-fond de la Niaye enregistrent respectivement des taux de 57 et 73% de phosphore minéral par rapport au phosphore organique. Ceci peut être dû à la nature ferrugineuse des sols Dior lessivés majoritaires dans le secteur. A ceci s'ajoute la présence de la pyrite framboïdale, une espèce minérale composée de Disulfure de fer (FeS_2)

ainsi que les processus d'échanges de base favorisant la fixation du Fer sur le complexe argilo-humique. Ceci pourrait ainsi contribuer à l'augmentation de ces taux en fer dans le milieu lors des phénomènes de dissolution (Niang, 1994). La forte présence de phosphore particulaire principalement sur le versant peut être due à l'activité agricole avec l'utilisation des fertilisants (engrais et amendements) pour augmenter le rendement de la production maraichère et à l'exploitation industrielle de phosphates.

De plus, les processus de lessivage des sols, la présence de minéraux argileux sur un sol riche en MO, les échanges de base, les phénomènes d'oxydo-réduction dans un milieu très hétérogène et humide justifieraient les fortes teneurs en fer dans le site de Mboro en général et en particulier dans les stations centre et bas-fond.

XII.8. Géochimie isotopique des eaux et des sédiments de la Niaye de Mboro

XII.8.1. Géochimie isotopique des eaux interstitielles

La signature isotopique des eaux interstitielles sur un transect versant-centre-bas-fond met en évidence un gradient de concentration selon le sens normal décroissant de la topographie en surface avec des eaux plus évaporées sur le versant et moins dans la dépression (Figure 87). On observe un appauvrissement des eaux interstitielles en fonction de la profondeur au niveau des trois stations. Cependant, les zones centre et bas-fond présentent des pics de concentration en $\delta^{18}\text{O}$ respectivement à - 40 cm (- 3,9 ‰) et - 50 cm (- 4,6 ‰). La traçabilité isotopique de ces eaux met en évidence un pic d'infiltration dû à un effet « piston flow » des eaux évaporées. Celui-ci atteint en premier la station centre puis le versant de la Niaye. Par contre, dans le profil bas-fond, le pic d'infiltration n'est pas perceptible mais plutôt une variabilité de teneurs le long de la zone non saturée. Ces valeurs à partir de - 5 cm sont supérieures à la droite de pondération des eaux de pluies estimé à - 5,1 ‰. Ainsi, le fractionnement isotopique par évaporation se fait sur les profils MB1, MB2 et la surface du profil MB3. En profondeur de MB3, des phénomènes de condensation ou de mélange d'eau peuvent se distinguer. Ceci peut provenir de l'apport vertical de l'eau de pluie, des apports latéraux provenant des versants par ruissellement et de la remontée de la nappe qui fluctue en fonctions des saisons. De plus, la présence importante de matière organique au niveau de la station en profondeur comme démontré précédemment (cf XII-4) ainsi que l'ensemble des processus biogéochimiques peut contribuer un enrichissement isotopique de cette zone.

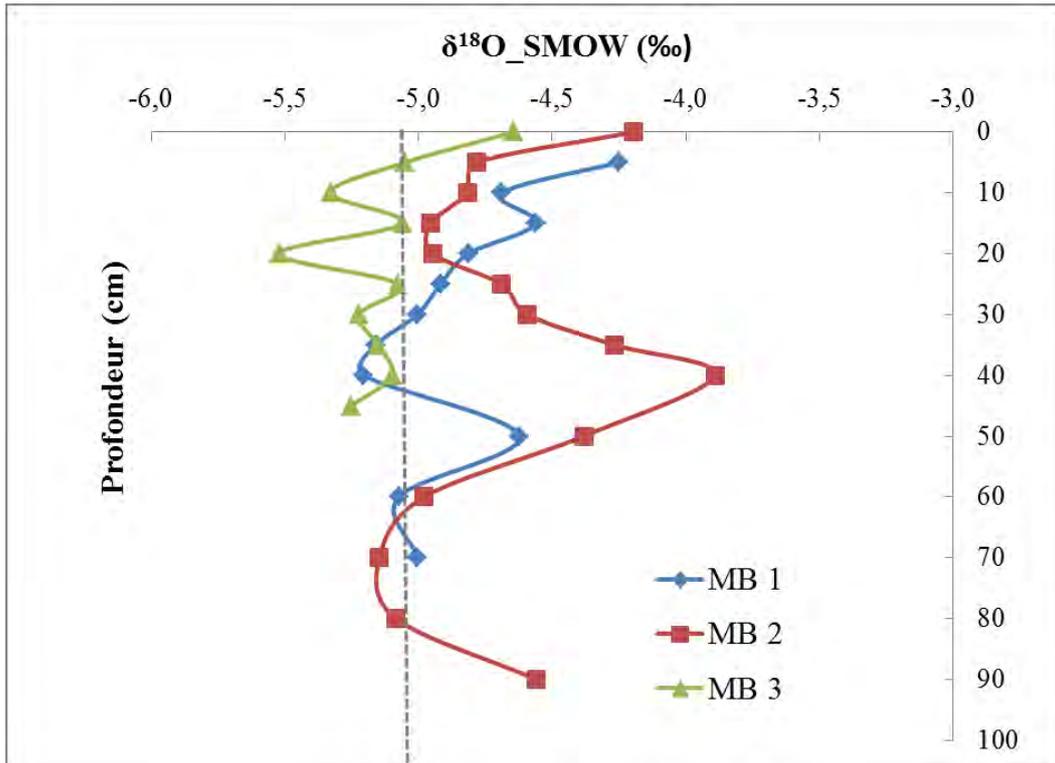


Figure 87 : Composition isotopique en fonction de la profondeur dans la Niaye de Mboro sur un transect Versant (MB1) - Centre (MB2) – Bas-Fond (MB3) (Octobre 2013) et la droite de pondération isotopique des eaux de pluie (en pointillé)

XII.8.2. Géochimie isotopique des sédiments : Approche $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ et C/N

Les isotopes stables $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ sont des indicateurs environnementaux importants de l'état d'évolution des écosystèmes naturels. Ils renseignent sur les sources d'énergie pour le carbone et de nutriments pour l'azote. Ce sont d'excellents traceurs de type de matière organique particulière dans les sédiments.

Les sédiments de Mboro présentent une teneur moyenne en isotope $\delta^{13}\text{C}$ de $-24,5 \pm 0,3$ ‰ et en isotope $\delta^{15}\text{N}$ de $1,8 \pm 0,7$ ‰. Elle enregistre un ratio C/N moyen de $28,9 \pm 3,2$ (Tableau 17). Les trois stations MB1, MB2 et MB3 présentent des taux respectifs moyens de 21, 27 et 24 %. Les teneurs en azote sont assez similaires avec une moyenne de 0,8 % et la zone centrale présente un C/N moyen dominant de 32,6. La zone bas-fond présente un taux plus élevé 0,9 % par rapport aux deux autres. Ceci peut se confirmer par la présence d'azote dissous mise en évidence par les flux de diffusion des ions ammonium plus importants dans le bas-fond de la Niaye.

Tableau 17 : Synthèse des données isotopiques sur les sédiments de Mboro

Stations	$\delta^{15}\text{N}$	$\delta^{13}\text{C}$	% C	% N	C/N
MB 1	2,5	-24,7	20,7	0,8	27,3
MB 2	1,2	-24,2	27,4	0,8	32,6
MB 3	1,6	-24,6	23,6	0,9	26,8
Moyenne	1,8	-24,5	23,9	0,8	28,9
Ecart-type	0,7	0,3	3,4	0,0	3,2

En analysant la signature isotopique en fonction de la profondeur, les valeurs en isotopes $\delta^{13}\text{C}$ varient entre -27 et -21 ‰ avec des sols plus enrichis en surface qu'en profondeur (Figure 88-A). En surface, le $\delta^{13}\text{C}$ enregistre des taux de -23, -24 et -24 ‰ et en profondeur - 27, -27 et -26 ‰ respectivement aux stations MB1, MB2 et MB3. Des pics de concentration de - 21 et -22 ‰ dans le centre et le bas-fond de la Niaye sont identifiés à 15 cm de profondeur. De 0 à -15 cm, la diminution du taux de $\delta^{13}\text{C}$ se fait du bas-fond vers le versant. De -15 à -50 cm, la partie centrale de la dépression présente une forte concentration en $\delta^{13}\text{C}$, alors qu'après -50 cm ces valeurs ont tendance s'homogénéiser sur les trois stations.

La composition isotopique en $\delta^{15}\text{N}$ le long de la zone non saturée met en exergue une variation des teneurs entre - 1 à 6 ‰ (Figure 88-B). Cette signature est plus élevée sur le versant et moins importante dans la partie centrale. Elle enregistre des teneurs respectives en surface de 6, 4 et 4 ‰, et au niveau de la zone capillaire de 5, 3 et 1 ‰ respectivement à MB1, MB2 et MB3. Un pic minimal de - 0,8 ‰ est enregistré à -25 cm à MB 2 et maximal de 4 ‰ à MB 1 à -15 cm.

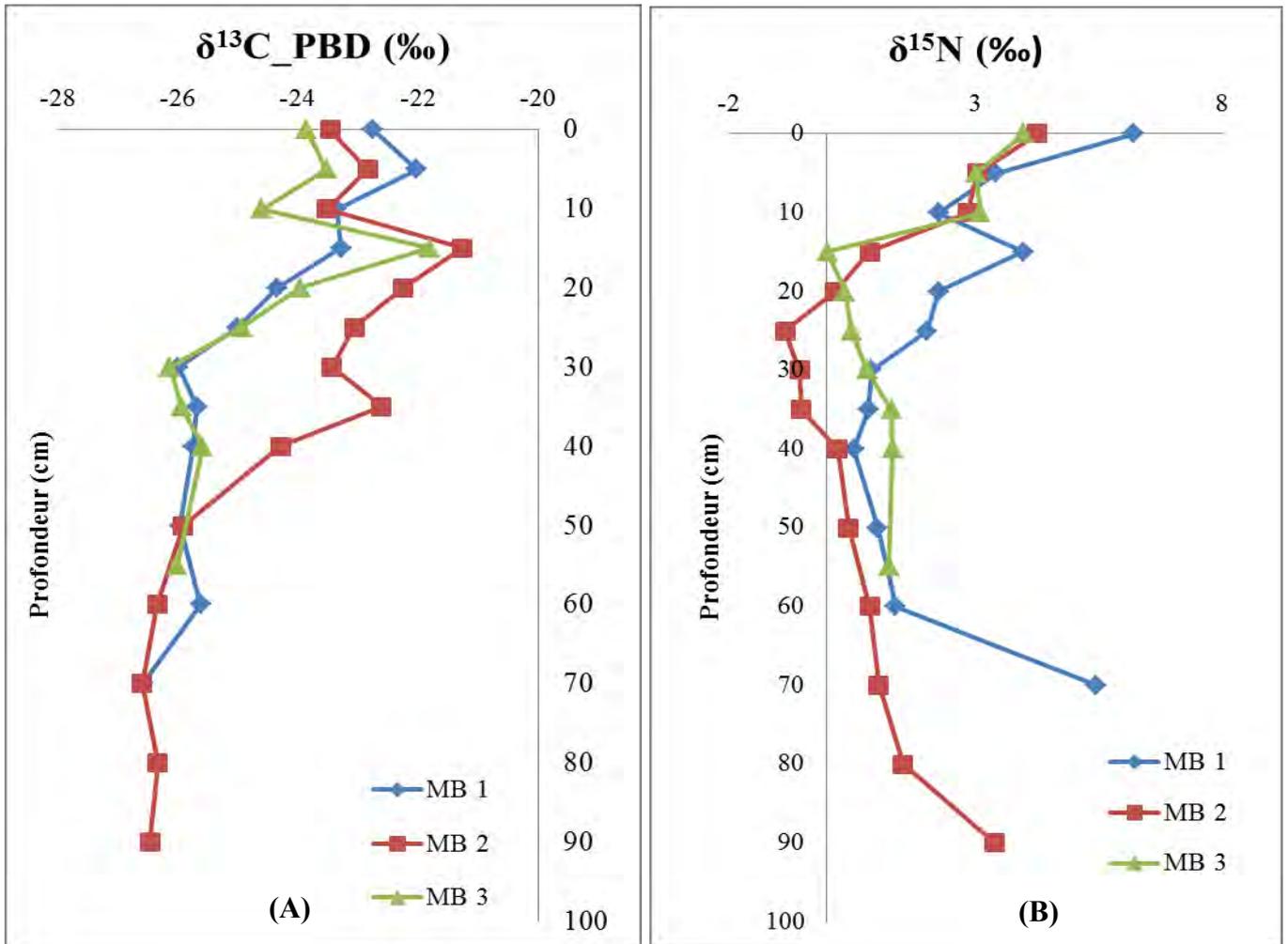


Figure 88 : Variation $\delta^{13}\text{C}$ (A) et $\delta^{15}\text{N}$ (B) en fonction de la profondeur dans la Niaye de Mboro sur un transect Versant (MB1) - Centre (MB2) – Bas-Fond (MB3) (Octobre 2013)

Une variabilité antagoniste entre les teneurs en isotopes $\delta^{13}\text{C}$ et le $\delta^{15}\text{N}$ se distingue avec une augmentation de carbone dans les sédiments qui se corrèlerait à une diminution des taux d'azote comme le montre bien la zone centre de la Niaye de Mboro.

Ainsi, l'ensemble des données isotopiques des eaux interstitielles et pluies ($\delta^{18}\text{O}$) et des sédiments ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ et C/N) au niveau des trois stations versant-centre-bas-fond ont permis de réaliser la traçabilité de l'eau le long de la ZNS, déterminer les sources des éléments chimiques et des processus géochimiques qui affectent la zone humide de Mboro. Il existe donc une variabilité spatiale du transfert de l'eau de la surface du sol à la frange capillaire et des processus géochimiques de la Niaye de Mboro.

XII.9. Sources et processus biogéochimiques du carbone et de l'azote

Cette analyse a été réalisée en comparant les données isotopiques obtenues sur les sédiments de Mboro en $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, les rapports C/N et les sources de carbone et d'azote déterminées par les travaux de Findlay and Kendall (2007). En effet, le stock de carbone dans la Niaye de Mboro provient principalement des sols et de la végétation, et aussi des macrophytes de cet écosystème humide (Figure 89). La matière organique de la station versant est principalement issue des sols et du couvert végétal. Celles des stations centre et bas-fond enregistrent une forte contribution des macrophytes qui sont essentiellement des plantes aquatiques de type algal (phanérogames, rhydropytes, chlorophytes, phanéophytes). Ainsi, les plantes terrestres et aquatiques, les algues, la MO des sols, la biomasse microbienne et le carbone organique dissous peuvent contribuer à augmenter ces quantités de carbone. Ceci a été confirmé par les travaux de Kendall et *al.*, (2001), Reddy et Delaune, (2008).

Par ailleurs, plusieurs processus biogéochimiques telle que l'oxydation des composés organiques contribuent à l'augmentation de ces concentrations. Le fractionnement isotopique est généralement associé à la minéralisation de la matière organique (Lu, 2016). Les dégradations préférentielles de la matière organique en composés organiques (Carbohydrates et Acides aminés) marquant un enrichissement semblent changer les valeurs isotopiques $\delta^{13}\text{C}$ et $\delta^{15}\text{N}$ des sédiments lorsque les sources originelles ne sont pas identifiées (Xiao et Liu, 2010). De plus, l'assimilation du carbone et de l'azote par les plantes peut être contrôlée par la photosynthèse du phytoplancton. Certaines études ont montré que la concentration ambiante du carbone organique dissous et particulière du phytoplancton était isotopiquement plus faible que le carbone inorganique dissous avec des valeurs moyennes de 20 % dont la variabilité est déterminée par les conditions locales (Lu et *al.*, 2016, Liu et *al.*, 2007, Keller et Morel, 1999). Les plantes aquatiques dérivent leur carbone du carbone inorganique dissous (Hilaire-Marcel, 1986). Ce carbone, dans les eaux douces, provient du CO_2 atmosphérique, de la dissolution des roches et de la respiration des plantes. Il est en équilibre avec le CO_2 atmosphérique qui a une composition isotopique en $\delta^{13}\text{C}$ de 0 ‰.

La respiration est un des principaux processus biochimiques contribuant à l'augmentation des teneurs en $\delta^{13}\text{C}$. Ce processus est associé à la photosynthèse qui permet aux végétaux grâce à la lumière de synthétiser leur propre matière organique. Les épisodes de bloom algal sont principalement présents en milieu humide. Ces processus sont contrôlés par la température (Kendall et *al.*, 2001).

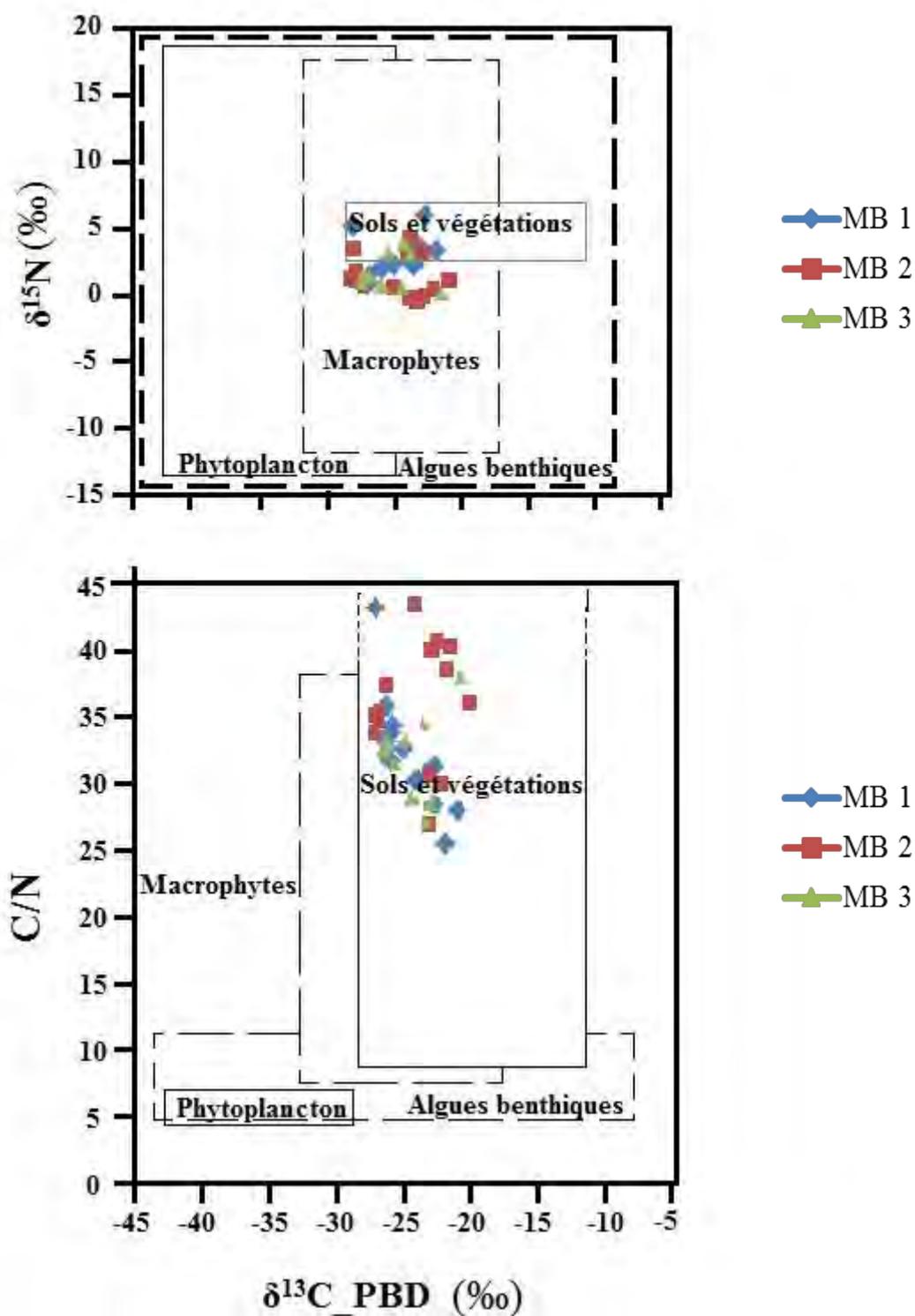


Figure 89 : Sources du carbone et azote issues des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ vs $\delta^{15}\text{N}$ et $\delta^{13}\text{C}$ vs C/N

Aussi, la pression partielle du CO₂ de l'air et des sols ainsi que les échanges au cours des réactions physico-chimiques et biogéochimiques contribuent à augmenter le taux de carbone dans la Niaye de Mboro. Le processus de dissolution des carbonates est observé essentiellement sur le versant de la Niaye de Mboro (Figure 90).

L'azote peut se présenter sous deux formes : l'azote inorganique (NH₄⁺, NO₃⁻) et l'azote organique (acides aminés). Cependant les plantes terrestres enregistrent une valeur de δ¹⁵N entre - 6 et 5 ‰. Or, l'azote de l'air et l'azote biodisponible dans les sols peut être assimilé par les plantes dans les zones humides. Il peut donc y avoir un mélange de sources ayant des compositions isotopiques différentes au sein de la Niaye de Mboro. Par ailleurs, plusieurs processus biogéochimiques telles que la volatilisation, la nitrification et dénitrification peuvent modifier la valeur de δ¹⁵N de NH₄⁺ et NO₃⁻ qui sont préférentiellement utilisés par les plantes (Handley et al., 1999).

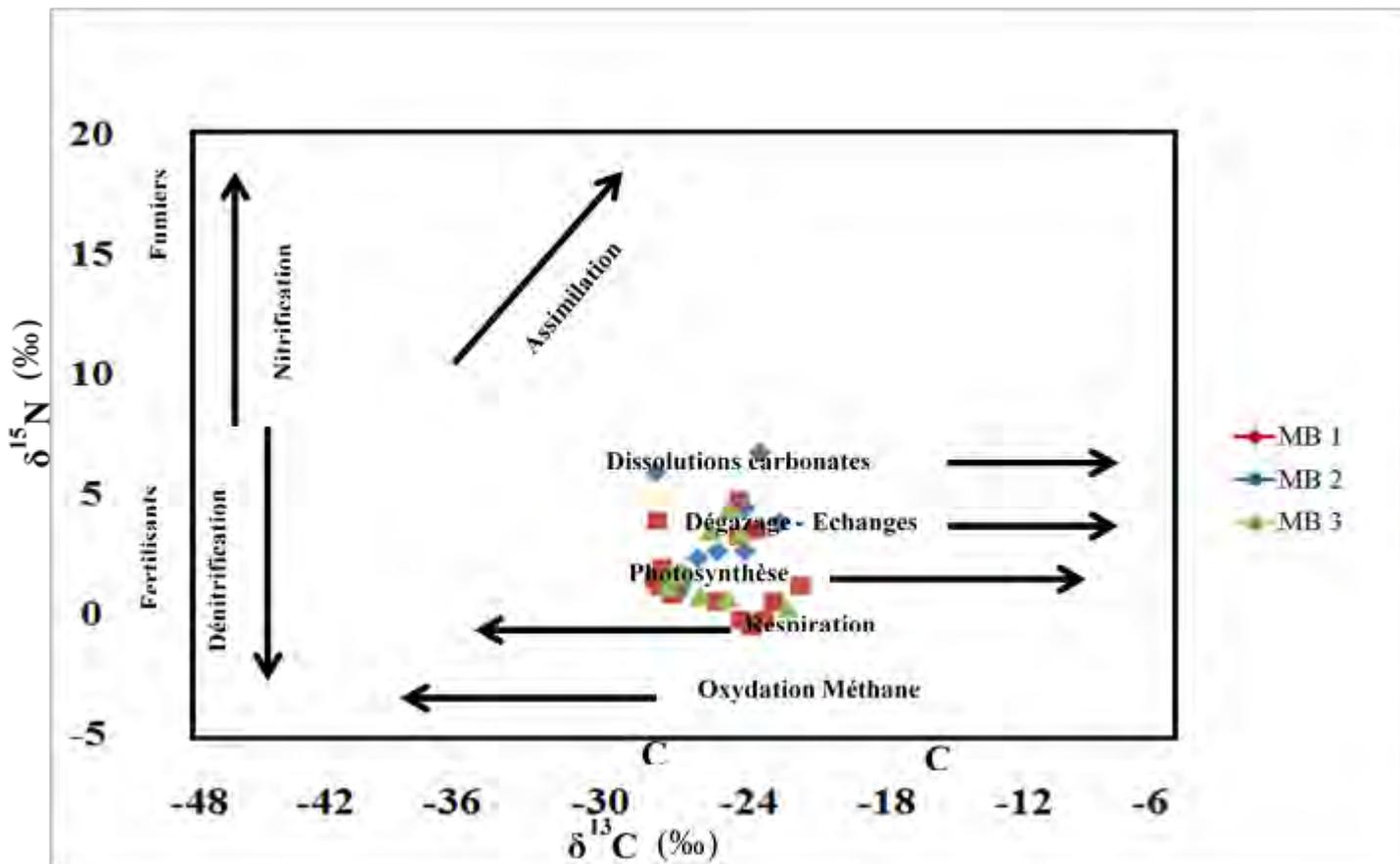


Figure 90 : Processus biogéochimiques et Origine du carbone et de l'azote

La composition isotopique de la matière organique des sédiments reflète largement celle des plantes évoluant dans le milieu. L'azote inorganique dissous peut provenir de la minéralisation de la matière organique et des processus de nitrification et ammonification le long de la zone non saturée. Cet azote peut avoir des origines anthropiques tels que les fertilisants agricoles, les aliments d'animaux, les déchets urbains, les fertilisants synthétiques ayant une signature isotopique de $\delta^{15}\text{N}$ entre 3 et 12 ‰ (Findlay et Kendall, 2007, Vitousek et *al.*, 1997). Il peut aussi avoir une origine naturelle (l'atmosphère), organique (détritiques de végétaux, déjections animales, activité microbienne de remobilisation de la matière organique) ou minérale.

XII.10. Evolution de la matière organique : Caractère biodégradable

L'environnement de la Niaye de Mboro est assez complexe du fait de la forte biodiversité, la richesse des sols en MO, la pluviométrie relativement meilleure dans le secteur, la proximité de la nappe ainsi que la continuité vers la mer. Ces facteurs vont donc influencer la géochimie de cet écosystème.

L'analyse du rapport C/N permet d'évaluer le pouvoir de l'activité biologique des sols. Il informe sur le degré d'évolution de la matière organique et le potentiel biodisponible de l'azote dans les sols. Les ratios C/N varient de 16 à 44, de 18 à 44 et 19 à 29 avec des moyennes de 27, 33 et 27 respectivement aux stations MB1, MB2 et MB3 (Figure 91). Ce ratio augmente avec la profondeur sur le versant de la surface à la frange capillaire, il croit puis décroît respectivement à MB2 et MB3 avec une phase de croissance plus importante jusqu'à -40 cm à MB2. Il se distingue une tranche de sol caractéristique de 20 à 50 cm de profondeur dans la station centre (MB2) avec un ratio C/N variant entre 35 et 44. Un pic de concentration de 36 est observé à -15 cm dans la station bas-fond avant sa baisse progressive jusqu'à la zone capillaire. Ces résultats confirment une MO ensevelie plus importante dans la partie centrale de la Niaye de Mboro et montre que l'activité bactérienne utilise plus l'azote des sédiments qu'il n'en libère pour la croissance des végétaux.

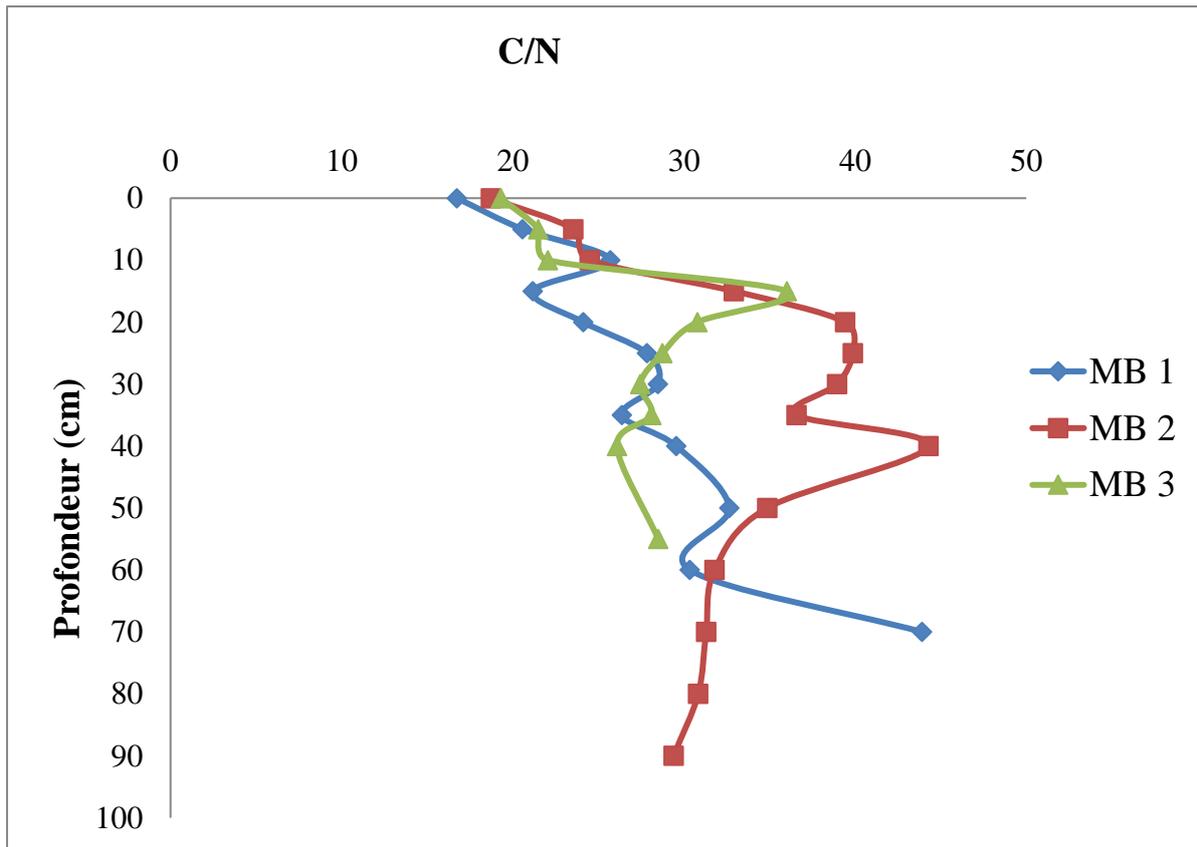


Figure 91 : Ratio C/N dans la Niaye de Mboro en fonction de la profondeur dans la Niaye de Mboro sur un transect Versant (MB1) - Centre (MB2) – Bas-Fond (MB3) (Octobre 2013)

Ainsi, la matière organique en profondeur a évolué et la biodisponibilité de l'azote relativement faible à MB2. Aussi, la décroissance du rapport C/N observée dans les profils MB2 et MB3 peut être liée à une immobilisation du taux d'azote accompagnée par une reminéralisation du carbone (Solling *et al.*, 1984).

L'allure des courbes dénote ainsi des comportements différents en termes de dégradation de la MO montrant un dépôt plus important dans la station centre que sur le versant. Ceci ne suit donc pas un gradient normal de concentration croissante en fonction de la topographie versant-centre-bas-fond d'une dépression ; un relargage des constituants organiques après la saison des pluies et un dépôt hétérogène des particules dans la dépression pourraient être la principale cause. De plus, la remontée de la nappe dans la station bas-fond peut mettre en suspension et repousser les solutés et constituants organiques dans la station centrale induisant une décomposition de la MO atteignant le stade avancé de tourbe en profondeur. Ceci implique donc une variation spatiale et temporelle du stock de carbone et d'azote. Cette analyse a conduit aussi à déterminer des processus géochimiques d'accumulation ou de relargage du carbone et

de l'azote en fonction du degré de dégradation de la MO, de la position dans la dépression et des conditions du milieu, et de la fluctuation du niveau de la nappe phréatique en fonction des saisons.

L'analyse du ratio C/N en fonction de la teneur en $\delta^{13}\text{C}$ montre que la zone de Mboro est caractérisée par un couvert végétal représenté essentiellement par les plantes de type C3 (Meyers et al., 1999). Ces valeurs sont plus faibles sur le versant avec un minimum de 17 et plus importante au niveau de la station centre avec un maximum de 44 (Figure 92).

En effet, les plantes terrestres utilisent généralement le cycle C3 avec une moyenne de $\delta^{13}\text{C}$ (PDB) de -28 ‰ et pour le cycle C4 de -14 ‰ (O'Leary, 1988). Le $\delta^{13}\text{C}$ de la matière organique des algues peut augmenter jusqu'à -9 ‰ lesquels se range dans les plantes en C4. Le taux de $\delta^{13}\text{C}$ dans le CO_2 atmosphérique est de -7 ‰ (Meyers et al., 1999).

Dans la Niaye de Mboro, la composition isotopique moyenne est de -25 ‰ alors que celle des plantes en C3 est de -28 ‰. Cette diminution peut se justifier par le fait qu'en saison de pluie et peu après lorsque la nappe affleure, on observe un mélange entre les débris de plantes vasculaires (particulièrement les herbacées, graminées) et d'autres plantes aquatiques (algues, mousses, sphaignes, nénuphar...) qui vont modifier la signature isotopique du secteur.

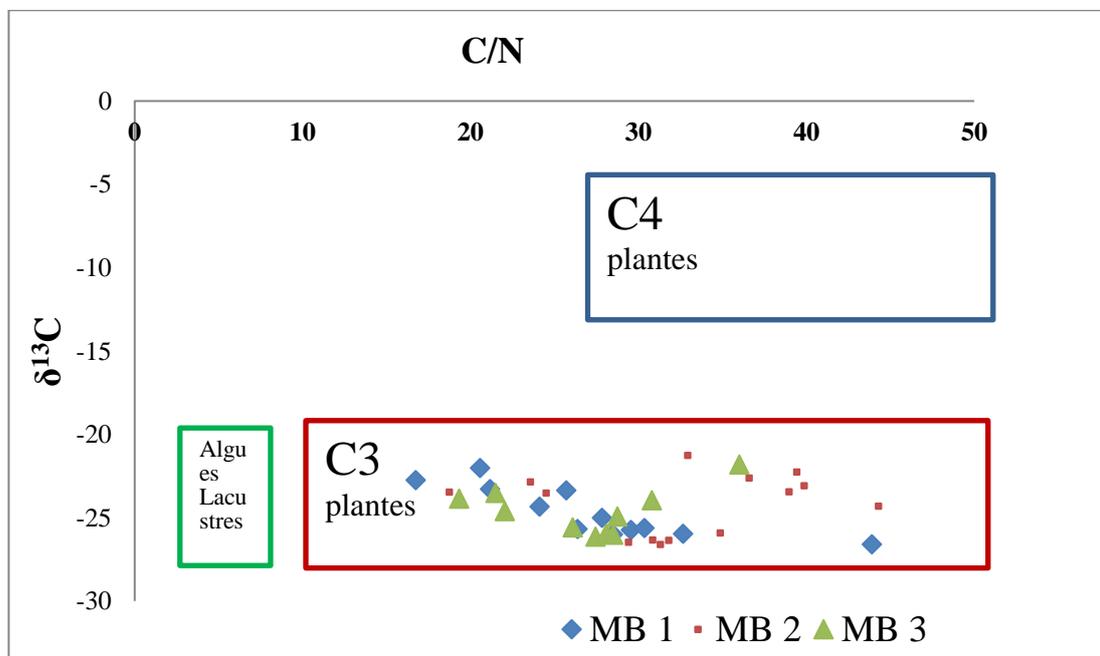


Figure 92 : Valeurs $\delta^{13}\text{C}$ vs C/N des principaux types de plantes source de matière organique (Meyers et al., 1999) modifiée

En comparaison avec la signature isotopique du CO₂ atmosphérique, une assimilation de CO₂ de l'air et des sols peut être prise aussi en compte.

Le ratio C/N des sédiments est plus faible sur la station versant que sur les stations centre et bas-fond de la Niaye car ces dernières reçoivent une quantité plus importante de débris végétaux par les phénomènes de ruissellement et d'accumulation.

Le ratio C/N de la MO en profondeur est plus élevé que celui en surface. Ceci peut être dû au dépôt, au tassement et à l'enfouissement des substances organiques ainsi qu'à leur dégradation. Toutefois, la dégradation partielle de la MO durant la diagenèse précoce peut modifier la composition élémentaire et par conséquent le ratio C/N de la MO des sédiments. Ce changement peut refléter une dégradation sélective du carbone riche en végétaux enfouis dans le sol comme c'est le cas pour l'écosystème de la Niaye de Mboro.

Dans d'autres écosystèmes, la MO issue des algues présente un rapport C/N qui augmente avec la sédimentation faible et précoce. Ce phénomène est observé dans les milieux eutrotophes qui ont une forte productivité tel que le lac Aydat de France (Sarazin *et al.*, 1992). Ces travaux indiquent une activité microbienne de dénitrification de la MO avec une augmentation du ratio C/N à une profondeur au-dessus de 40 cm le long de la ZNS. Par contre, les milieux lacustres oligotrophes présentent un ratio C/N communément décroissant avec la profondeur dans sédiments.

Dans la zone des Niayes, le dépôt des couches successives de litière et leur dégradation en MO ainsi que l'infiltration des eaux de pluie plus ou moins évaporées avec un temps de résidence plus ou moins long en fonction du type de sol et de la lithologie de la ZNS peut entraîner des pics de concentration en carbone comme c'est le cas à Mboro. A ceci s'ajoute, l'activité microbienne durant la diagenèse précoce qui peut potentiellement modifier la composition isotopique de la masse de carbone dans les zones humides. C'est donc un mélange de types d'éléments de compositions isotopiques différentes qui confèrent à ces sédiments une signature isotopique particulière. Cependant, en comparant le $\delta^{13}\text{C}$ organique des plantes, de celui piégé dans les sédiments profonds et humides superficiels, il se distingue un modèle intéressant de variation de la composition isotopique avec l'influence de la fluctuation de la nappe phréatique en fonction la saison et de la lithologie des sols.

Par ailleurs, la molécule d'azote atmosphérique $\delta^{15}\text{N}$ est 0 ‰ (Peters *et al.*, 1978) pendant que l'azote dissous a une valeur moyenne de +7 à +10 ‰. Cette différence est préservée dans la composition isotopique du plancton ($\delta^{15}\text{N} = +8$ ‰) et celle des plantes terrestres C3 ($\delta^{15}\text{N} = +1$ ‰). De plus, la signature isotopique peut résulter de la dégradation préférentielle

relativement réactive des formes d'azote contenues dans la matière organique. En effet, la Niaye de Mboro avec des teneurs de $\delta^{15}\text{N}$ variant entre -1 et $+6$ ‰ indique des sources d'azote provenant principalement (i) de l'ammonium des sols associé à un phénomène de dénitrification, (ii) de l'ammonium des fertilisants précipitent dans le milieu (Cisse, 2012, Xu et *al.*, 2009, Kendall et *al.*, 2001,).

Toutefois, la dynamique du recyclage de l'azote et la discrimination isotopique de l'azote durant la consommation biologique introduit une variabilité considérable dans les valeurs (Jin et *al.*, 2015, Findlay et Kendall 2007, Fall, 1996, Fogel & Cifuentes, 1993). Ces changements environnementaux et saisonniers sont une des causes de la variabilité spatiale et temporelle de la signature isotopique dans les Niayes.

Conclusion du Chapitre XII

Les sédiments de Mboro renferment majoritairement des sables très fins à fins associés à des particules plus silteuses et argileuses davantage dans les stations versant et centre que dans la station bas-fond. Le milieu est généralement réducteur en surface et à partir de -30 cm, et oxydant les parties centrales des profils de la ZNS. Le pH est généralement acide en surface plus dans la station versant que dans les stations centre et bas-fond. Cette Niaye enregistre une concentration moyenne de COP de 18 % avec respectivement 16, 21 et 17 % dans les stations versant, centrale et bas-fond. Elle renferme une tranche de sol de -20 à -60 cm qui renferme plus de 30 % de COP principalement dans la station centre. La variabilité intense des concentrations de COP dans les premiers centimètres témoigne d'une instabilité du milieu et/ou une alternance de dépôts plus ou moins riches en substances organiques. Toutefois, les taux moyens de COD sont de 85, 33 et 38 mg/l respectivement dans les stations versant, centre et bas-fond de la Niaye. Aussi, la chimie des majeurs est très hétérogène au niveau des trente premiers centimètres puis elle s'homogénéise généralement en profondeur à l'exception des nitrates. Ces ions soulignent des processus d'ammonification et de nitrification dans la zone de battement de la nappe. Les fortes concentrations en éléments chimiques peuvent provenir de la forte activité anthropique avec l'utilisation des engrais et fertilisants en vue de l'amélioration du rendement agricole principalement au niveau de la station versant ; du retour à la nappe des eaux usées issues des rejets industriels et domestiques par ruissellement dans la dépression. Ils peuvent aussi provenir des processus naturels tels que l'évaporation, le lessivage des sols, l'hydrolyse des minéraux argileux, la dissolution du CO₂ atmosphérique et des sols, et la dissolution des minéraux et roches dans un environnement chaud et humide

La forte capacité de rétention d'eau des sédiments de la Niaye de Mboro atteignant plus de 80 % dans la zone de stockage pourrait être due à la présence de tourbes principalement de -10 à -60 cm de profondeur à des degrés différents dans les profils ZNS des trois stations.

Aussi, la matière organique à Mboro est mature et homogène en surface. Elle devient immature et hétérogène en profondeur. Il se distingue donc une alternance entre les processus d'une part d'accumulation des substances organiques hydrocarbonées pouvant évoluer jusqu'au stade ultime de tourbes en milieu humide faiblement oxygénée et d'autre part une dégradation par les processus biogéochimiques ou de minéralisation de la matière organique.

Par ailleurs, ces sédiments généralement saturés en eau enregistrent des flux d'échanges en ions PO₄³⁺ plus importants dans les stations versant et centre avec en moyenne 3,2 et 4,9 mmol/m/j ; alors que la station bas-fond présente les teneurs les plus élevées (1,7. 10⁻³

mmol/m²/j) des flux d'échange des ions NH₄⁺. De plus, les concentrations en phosphore particulaire sont plus élevées en moyenne dans la station versant (356 µg P/g de sédiment) et en fer total dans la station bas-fond (19 877 µg Fe/g de sédiment). Ce phosphore est majoritairement minéral beaucoup plus lié au fer qu'au calcium davantage dans la station versant que dans les stations centre et bas-fond.

Par ailleurs, la signature isotopique des eaux interstitielles a mis en évidence un gradient de concentration selon le sens normal décroissant de la topographie avec des eaux plus évaporées dans la station versant par rapport aux stations centre et bas-fond.

Les sédiments de Mboro présentent une teneur moyenne en isotope δ¹³C de - 25 ± 0,3 ‰ et en isotope δ¹⁵N de 2 ± 0,7 ‰. Ils enregistrent un ratio C/N moyen de 29 ± 3,2. La matière organique du versant est principalement issue du couvert végétal et des sols. Celles des stations centre et bas-fond enregistrent aussi une forte contribution des macrophytes qui sont essentiellement des plantes aquatiques de type algal. Le fractionnement isotopique est généralement associé à la minéralisation de la MO. Les processus d'oxydation et la respiration des végétaux influencent la composition isotopique du carbone des sédiments de la Niaye. Toutefois, le processus de dissolution des carbonates est particulièrement observé dans la station versant. La signature isotopique de la MO de Mboro reflète donc celle des plantes évoluant dans le milieu. L'azote inorganique dissous peut provenir de la minéralisation de la matière organique et des processus de nitrification et ammonification le long de la ZNS. Cet azote peut être avoir des origines anthropique (fertilisants agricoles), naturelle (atmosphère), organique (détritus de végétaux, déjections animales, activité microbienne) ou minérale.

Dans cette zone humide, le relargage des constituants organiques après la saison des pluies peut entraîner un dépôt hétérogène des particules dans la dépression. De plus, la remontée de la nappe dans la station bas-fond met en suspension et peut repousser les solutés et constituants organiques au niveau de la station centre induisant une décomposition plus importante de la MO en profondeur. Ainsi, cette station centre est très riche en MO particulièrement de 20 à 60 cm de profondeur. Cette MO est issue principalement de la dégradation des plantes à cycle photosynthétique C3. De plus, l'augmentation des taux de carbone se corrèle avec une diminution des taux d'azote dans l'ensemble de la dépression. Cette zone humide renferme donc un stock de carbone issu principalement de la MO particulaire des sols, des débris de végétaux et litière, du COD et la biomasse microbienne.

**PARTIE IV : FONCTIONNEMENT HYDRO-GEOCHIMIQUE ET SEDIMENTAIRE DE
L'ECOSYSTEME DES NIAYES SUR LE LITTORAL NORD**

La Niaye de Mboro présente donc un fonctionnement hydrogéochimique hétérogène en fonction de la position dans la dépression. Cette analyse à fine échelle confirme ainsi les hypothèses sur les variabilités spatiale à l'échelle locale de la Niaye et régionale du Littoral Nord des caractéristiques physiques et chimiques ainsi des processus hydrogéochimiques qui affectent cette zone humide agricole.



DISCUSSIONS
CONCLUSION GENERALE
ET PERSPECTIVES

Discussions

➤ Variabilité spatiale et temporelle du fonctionnement sédimentaire et hydrogéochimique des Niayes

Cette étude a mis en évidence une variabilité spatio-temporelle à l'échelle régionale comme à l'échelle des sites pilotes de Mboro, Lompoul et Potou. Cette variabilité s'est traduite par les caractéristiques granulométriques, minéralogiques, physico-chimiques, hydrochimiques et géochimiques qui sont différentes à l'intérieur des zones humides mais également suivant les trois sites. En effet, le site de Mboro se distingue de ceux de Lompoul et Potou par le caractère fin des sédiments qui sont plus silteux avec des taux d'argiles plus importants que les deux autres. Le cortège argileux est également plus diversifié avec des interstratifiés (Vermiculite-Smectite, Chlorite-Vermiculite), de l'Illite et de la Kaolinite. Les distributions granulométriques et minéralogiques sont différentes le long des profils de ZNS ; elles sont généralement plus variées en surface qu'en profondeur et beaucoup plus dans la station centre que la station versant à l'exception de la Niaye de Mboro où l'on retrouve des variations à l'intérieur des profils de la ZNS. Le suivi des conditions physico-chimiques du milieu montre que le potentiel redox et le pH sont des paramètres discriminants alors que la température ne montre pas de variation dans les sédiments des Niayes.

La teneur en eau dans les sédiments et la matière organique particulaire mettent en évidence différents gradients de variations plus importantes dans les stations centre que sur les versants. Les Niayes de Mboro et Lompoul présentent de plus fortes teneurs en eau et en COP qu'à Potou. Cependant, les sédiments de Potou renferment une quantité importante de COD. La variabilité de la qualité de la matière organique particulaire à Mboro se traduit par une MO riche en substances hydrocarbonés plus mature en surface qu'en profondeur, une MO plus oxydée et mature à Lompoul le long de la ZNS, et une MO minéralisée et immature à Potou dans les parties supérieures alors qu'elle est inexistante en profondeur. Les teneurs sont plus importantes dans les stations centre que les stations versants. De plus, la chimie des eaux interstitielles montre des eaux plus minéralisées à Lompoul en saison sèche et à Potou en saison humide par rapport à Mboro où elles présentent les plus faibles concentrations en toute saison. La variabilité de la composition isotopique des eaux interstitielles met en évidence des eaux plus enrichies à Lompoul, suivies de celles de Potou et enfin celles de Mboro, et ceci davantage en saison sèche qu'en saison humide. Ces facteurs se différencient bien au sein d'une même Niaye en fonction

de la position versant ou centre de la dépression, à l'échelle régionale de tout le littoral Nordselon la saison.

➤ **Etude comparative de la qualité et de l'origine de la matière organique des sédiments de l'écosystème des Niayes par rapport à d'autres écosystèmes humides**

L'évaluation qualitative de la matière organique des sédiments grâce au diagramme de Van-Krevelen à partir des indices IH et IO (Figure 93) met en évidence trois grands groupes :

- Les sédiments avec $IH \leq 100$ mg IH/g COT représentés essentiellement par les sédiments de la Guyane française (Marchand, 2008). Cette MO présente des forts indices IO et représente le type III de matière organique provenant des végétaux terrestres.
- Les sédiments ayant un IH compris entre 100 et 300 mg IH/g COT. Ce groupe comporte l'ensemble des sédiments des Niayes et peut se différencier en trois sous-groupes en fonction des teneurs croissantes en IO :
 - Le sous-groupe 1 avec $0 < IO < 100$ mg CO₂ /g COT composé principalement des sédiments de la station versant de Potou.
 - Le sous-groupe 2 avec $100 < IO < 200$ mg CO₂ /g COT composé essentiellement des sédiments de Mboro versant (MB1), bas-fond (MB3) et des stations centres de Lompoul (MB2) en profondeur et Potou (PON) ainsi que des sédiments de la Somone (Sakho et *al.*, 2015).
 - Le sous-groupe 3 avec $200 < IO < 300$ mg CO₂ /g COT, est représenté par les sédiments de la station centre (LON) de la Niaye de Lompoul.

Ces trois sous-groupes présentent une matière organique particulièrement issue des détritiques de plantes supérieures. Cette dernière s'identifie à différents degrés de maturation en fonction de son degré d'oxydation. Elle est plus oxydée à Lompoul, faiblement à Potou et intermédiaire à Mboro.
- Le groupe présentant un $IH > 300$ mg IH/g COT renferme principalement les sédiments superficiels de la station centre de Mboro (MB2), des stations versants de Mboro et Lompoul ainsi que certains sédiments de la Guyane (Marchand, 2008). Ces sédiments présentent principalement une origine algale et phytoplanctonique.

Les Niayes du Littoral Nord présentent une variabilité spatiale de la qualité de la MO en fonction du site et de la position dans la dépression, des taux de matière organique et leur degré d'évolution. Cette MO est donc de type II et principalement d'origine autochtone avec des degrés d'enrichissement et de dégradation différents selon les sites.

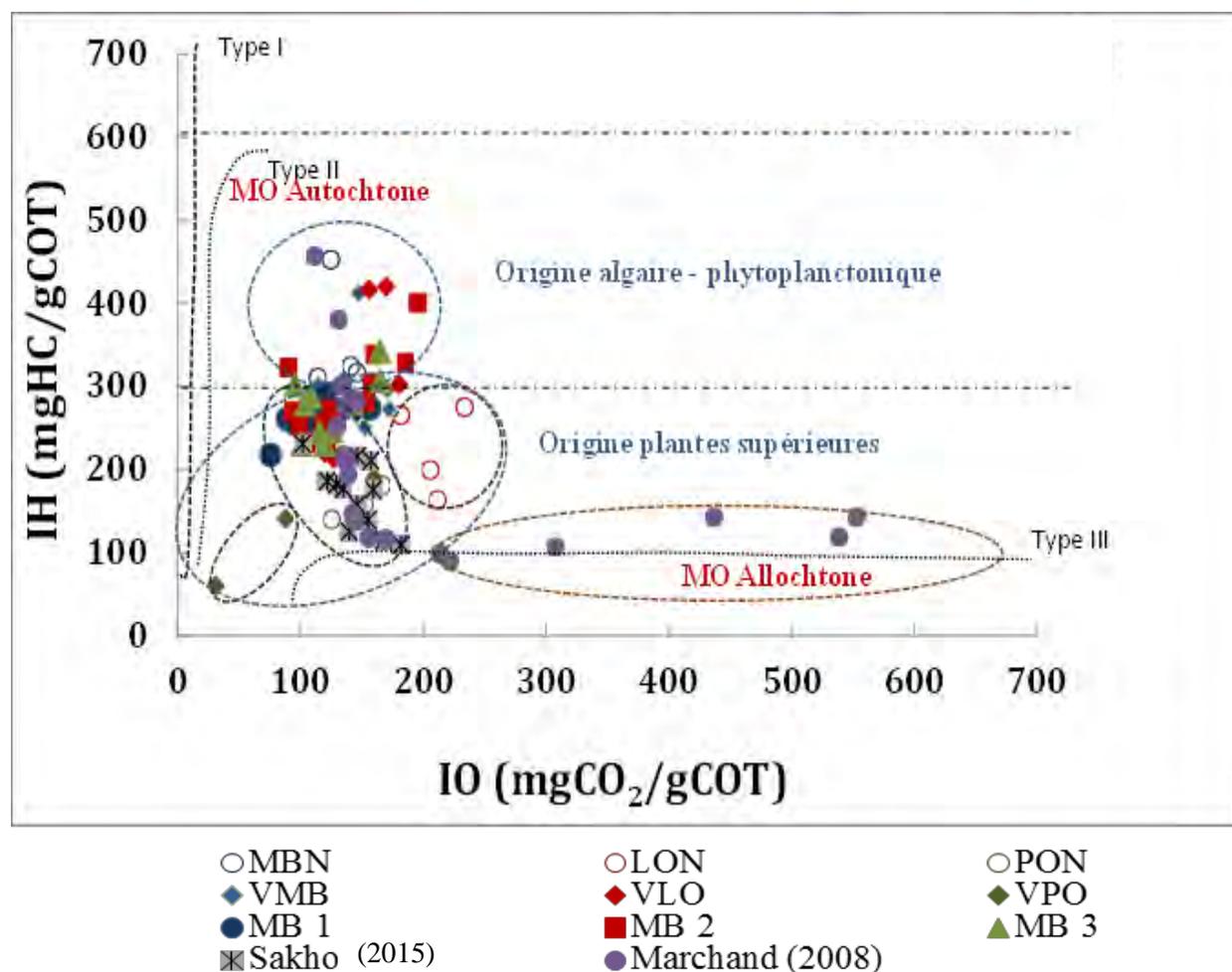


Figure 93 : Diagramme de Van-Krevelen de la MO sédimentaire

Ainsi, la matière organique de type II d'origine principalement algale et phytoplanctonique provient essentiellement de l'activité photosynthétique de ces écosystèmes humides (Disnar et *al.*, 2003, Meyers et *al.*, 1999). Elle caractérise bien les sédiments des zones humides du Sénégal tels que les Niayes, et la Mangrove de la Somone (Sakho et *al.*, 2015). Ces indices IH et IO présentent aussi des valeurs proches de celles des horizons organiques pédologiques superficiels alors que le type III provient des végétaux terrestres (Disnar et *al.*, 2003, Di-Giovanni et *al.*, 1998).

Le type I se caractérise par des valeurs d'IH et d'IO de la matière organique lacustre et peut être identique à celui des cuticules foliaires des végétaux supérieurs (Meyers & Lallier-Vergès, 1999 ; Talbot & Livingstone, 1989).

Par ailleurs, la matière organique d'origine pédologique peut à travers le ruissellement dans les dépressions se retrouver intégrer dans les sédiments lacustres sans que la diagenèse précoce n'ait affecté leurs identités géochimiques (Lüniger & Schwark, 2001). C'est le cas du lac de Maars en Allemagne qui montre des sédiments d'origine pédologique ayant des valeurs d'IH et d'IO comprises dans des gammes de valeurs de la MO de type II (Noël, 2001).

Les sédiments sont généralement affectés par des processus de diagenèse précoce, catagenèse et métagenèse. Ces réactions sont influencées par une augmentation de la température de craquage et de la teneur en IH. Elles peuvent ainsi déterminer l'hydrocarbure en maturation qui peut être pour le type I le domaine des huiles, le type II le domaine des huiles et gaz et le type III le domaine des gaz humides ou secs (Karitch, 2011). Il est à noter que la diagenèse précoce contribue à diminuer les teneurs en IH et IO. Elle s'effectue généralement sur des sédiments immatures et entraîne une oxydation de la matière organique.

Les trois sites pilotes de Mboro, Lompoul et Potou présentent donc une Matière Organique Particulaire (MOP) à différents degrés de maturation. En effet, l'accumulation de carbone organique particulaire est très importante dans les Niayes de Mboro et Lompoul. Le site de Mboro est marqué par sa richesse en substances hydrocarbonées avec le long de la ZNS une phase d'accumulation suivie d'une phase de dégradation de la MOP. Cette Niaye met en évidence des taux plus importants dans le centre de la Niaye que sur le versant. La Niaye de Lompoul est caractérisée par une accumulation croissante de la MOP jusqu'à la frange capillaire dans la station centre alors le versant présente une phase d'enrichissement puis de décomposition. Cette zone humide présente aussi des teneurs en COD plus importants qu'à Mboro. La Niaye de Potou présente une MOP minéralisée principalement sur son versant ; elle fonctionne comme une « source » de carbone, celles de Lompoul et Mboro à la fois comme « un puit et une source » de carbone avec une MOP plus dégradée à Lompoul qu'à Mboro.

Par ailleurs, les milieux humides sont des écosystèmes renfermant d'importantes sources nutritives tels que le phosphore et l'azote dont la composition peut impacter sur les paysages agricoles et forestiers ainsi que l'ensemble des êtres vivants qui y vivent. Le phosphore, élément essentiel à la croissance des plantes peut être lié à des formes inorganiques (Fer, Calcium) ou organique (matière organique). L'analyse de la distribution des formes de phosphore dans les

sédiments de Mboro au Sénégal et ceux d'autres lagunes méditerranéennes en France a montré deux grands groupes (Figure 94) :

- 1- Les sédiments de la Niaye de Mboro avec deux sous-groupes :
 - un pôle riche en fer, le plus important avec l'ensemble des sédiments de la station versant (MB1) et la majorité des sédiments de la station centre (MB2) et de la station bas-fond (MB3)
 - un pôle riche en matière organique représenté par les sédiments de Mboro aux profondeurs 20-25 cm et 25-30 cm de la station centre ainsi que ceux des profondeurs 10-15 cm et 15-20 cm de la station bas-fond.
- 2- Les lagunes méditerranéennes (Mesnage, 1994) avec deux sous-groupes :
 - un pôle riche en calcium (Prévoist et Mauguio)
 - un pôle riche en matière organique (Méjean, Thau et Perols)

Dans les sédiments de Mboro, la dominance du phosphore lié au Fer peut se justifier par la nature ferrugineuse des sols Dior dominant dans le secteur pouvant libérer du fer par lessivage des sols. A ceci s'ajoute la forte capacité d'échange cationique des sédiments avec le complexe argilo-humique, l'ensemble des processus biogéochimiques telles l'humification, la dissolution des roches, l'assimilation ou la libération des minéraux par les micro-organismes.

D'autres zones humides telle que la lagune côtière de Thau qui présente du phosphore lié à la matière organique, on note l'effet important de l'activité conchylicole qui produit du COP. Les étangs de Méjean et Pérols ont aussi une forte teneur de phosphore lié à la matière organique cependant les étangs de Prévoist et Mauguio enregistrent des teneurs élevées en phosphore lié au calcium (Figure 94). Ce phosphore inorganique peut provenir de la lithologie des sols (Yang et al., 2012, Mesnage et al., 2007).

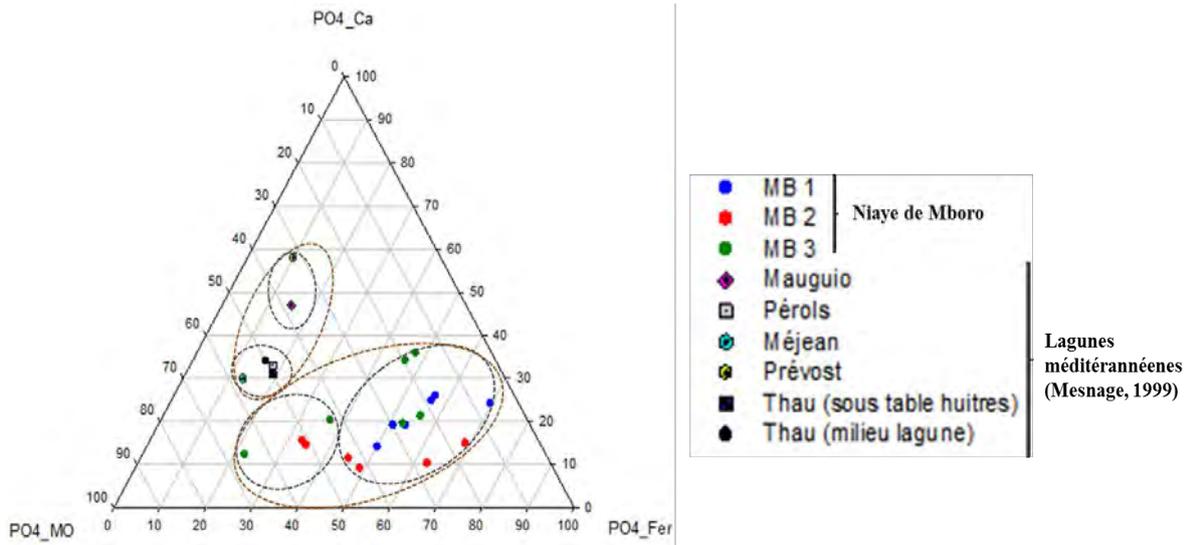


Figure 94 : Distribution des formes de phosphore particulaire dans différentes zones humides

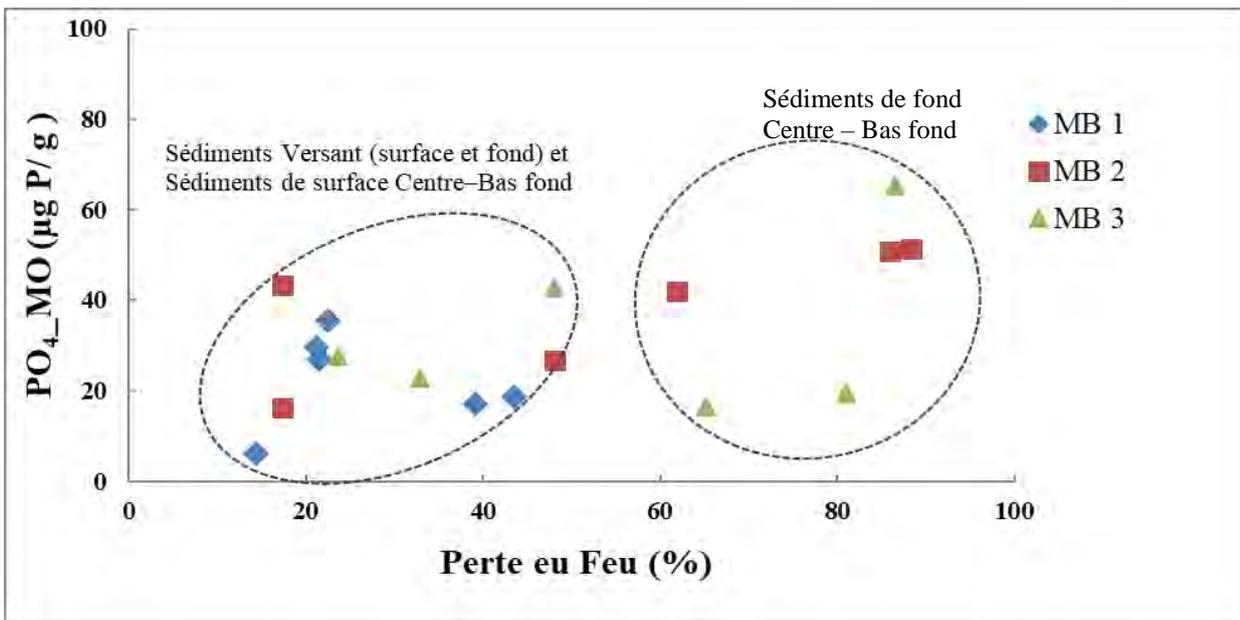


Figure 95 : Relation PO₄_MO vs Perte au Feu

Aussi, la teneur en carbone par perte au Feu ne présente pas de relation linéaire avec le phosphore lié à la MO (Figure 95). Ce graphique montre deux groupes :

- 1- un groupe avec des teneurs en carbone inférieures à 50 % représenté par l'ensemble des sédiments du versant et les sédiments de surface des stations centre et bas-fond.
- 2- un groupe avec des teneurs en carbone supérieures à 50 % constitué par les sédiments de fond de la station centre (de 20 à 35 cm à MB2) et ceux de la station bas-fond de (15 à 30 cm à MB3)

Il apparait que le phosphore présent sur le versant est majoritairement assimilé sous forme dissoute par les plantes pour leur croissance. Le phosphore présent en profondeur dans les stations centre et bas-fond est associé à la matière organique pour former du phosphore organique particulaire. Il existerait probablement un équilibre entre la phase adsorbée aux éléments minéraux et organique du sol, et la phase dissoute dans l'eau biodisponible pour la nutrition des plantes. Cependant, le phosphore particulaire présent en profondeur au niveau de la station centre proviendrait essentiellement de la dégradation des tissus des organismes végétaux et animaux ainsi que des micro-organismes du milieu. Il peut aussi provenir par ruissellement des apports anthropiques tels que les engrais et fertilisants fortement utilisés sur la zone versant pour améliorer les rendements agricoles (Cisse et al., 2006).

Les zones humides à l'exemple de celle de Mboro retiennent les nutriments tels que le phosphore et l'azote en fonction de sa source, des conditions du milieu et des saisons, de la capacité de rétention et d'adsorption du sol. Cette rétention dépend également de la teneur en eau dans les sédiments. C'est ainsi que plus la zone humide est traversée par un flux important d'eau plus le phosphore biodisponible est important de 5 à 90 % (Fardeau et Dorioz, 2000) alors que lorsque la quantité d'eau est plus faible, le phosphore particulaire est plus important comme l'ont montré précédemment les figures 80 et 84-A.

➤ **Les processus de dégradation de la matière organique et conséquences sur la chimie de l'eau**

Il est important de faire le lien entre la qualité de la ressource en eau qui alimente les Niayes étudiées et les processus hydrogéochimiques dans les sédiments telle que la dégradation de la MO. Ces processus de dégradation de la MO sont contrôlés par les conditions d'oxydo-réduction dans le sédiment. Certains facteurs peuvent impacter la qualité et la quantité de la MO comme la bioturbation, le labour des sédiments, l'impact de la texture des sédiments, le transport des eaux et solutés, et l'irrigation (Meysman et al., 2006). Ces effets sont principalement marqués en surface dans les zones humides dépressionnaires à forte activité agricole comme les Niayes. En profondeur, le phénomène de diagénèse est dominant à l'exemple de la station centre de la Niaye de Lompoul conduisant à la formation des tourbes dans des conditions anaérobies contrôlées par les facteurs du milieu (pluviométrie, teneur en eau des sols, niveau de la nappe, température, type de sol). A ceci s'ajoute le type et la densité du couvert végétal ainsi que son degré de dégradation et d'enfouissement dans le sol.

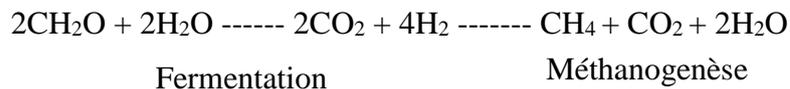
DISCUSSIONS

Selon les travaux de Berner et *al.*, (1980), Findlay & Kendall, (2007), les quantités substantielles de Carbone Organique Dissous (COD) sont produites au cours de la décomposition de la MO avec une augmentation des conditions aérobies comme c'est le cas à Potou au niveau de la surface de la station versant où les teneurs atteignent 2411 mg/l. Ce processus a été observé dans la forêt de mangrove en Guyane française (Marchand et *al.*, 2004). Aussi, l'accumulation de la MO peut être favorisée par le milieu réducteur et la présence de pyrite dans le milieu. Cette forte accumulation d'éléments dissous va s'infiltrer à travers la zone non saturée et atteindre la nappe phréatique. Cette infiltration est principalement fonction du type de sol et l'épaisseur de la ZNS induisant ainsi la dégradation de la qualité chimique des eaux de la nappe.

Par ailleurs, les principales réactions d'oxydo-réduction identifiées au sein des zones humides des Niayes sont la respiration, la dénitrification, la réduction du Manganèse, l'ammonification, la réduction du Fer puis celle des Sulfates et enfin la méthanogénèse (Figure 96).

Ces réactions produisent du COD. En effet, ces processus nécessitent la présence du tissu microbien dans les réactions de réduction du fer et du manganèse important dans le cycle du carbone qui affecte la chimie de l'eau et celles des sédiments (Routh et *al.*, 2009, Wetzel, 2001) et particulièrement celles des bactéries sulfato-réductrices pour la réduction des sulfates.

De plus, les environnements sédimentaires anoxiques favorisent la dégradation de la MO et conduisent à la réduction du Manganèse et des Oxydes de Fer, puis des Sulfates et enfin les processus de fermentation du Méthane (Song et Muller, 1999). En effet, la méthanogénèse est un processus qui contribue à augmenter les concentrations en carbone et méthane dans les sols (Clark et Fritz, 1999). Ce phénomène semble se produire à Lompoul où un dégazage de méthane et/ou de sulfure d'hydrogène a été observé au cours de l'échantillonnage des sédiments en profondeur de la station centre. Toutefois, en l'absence des accepteurs d'électrons comme O₂, NO₃ et SO₄, les bactéries vont prospérer dans les substrats organiques en produisant du CO₂ et CH₄ directement par le processus de fermentation suivi de la méthanogénèse selon l'équation :



Concernant le site de Mboro en saison humide, les différents processus géochimiques ont pu être déterminés grâce aux valeurs de potentiel d'oxydo-réduction enregistrés à une échelle fine de 5 cm le long de la zone non saturée des trois stations pilotes (Clark et Fitz, 1999) :

- Dans la station versant, la réduction des sulfates à l'aide des bactéries sulfato-réductrices s'effectue à la surface du sol en milieu réducteur (-100 mV); la réduction du Fer et

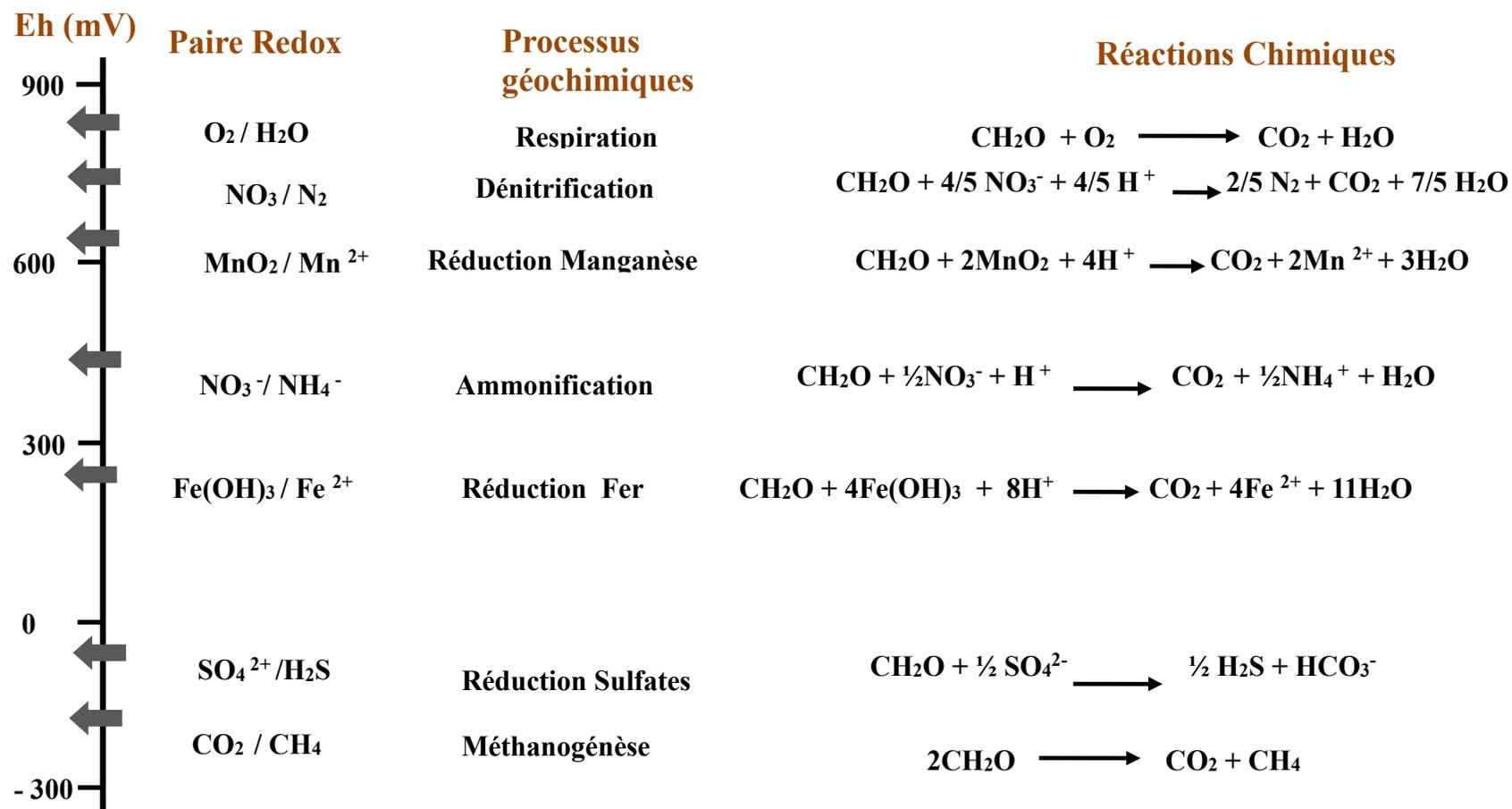


Figure 96 : Séquence des principales réactions Redox produisant du carbone organique dissous à pH neutre des eaux souterraines en accord avec le potentiel d'oxydo-réduction (Clark et Fitz, 1999 modifiée)

l'ammonification en milieu oxydant (200 à 400 mV) de – 5 à – 38 cm. A partir de – 40 cm, la réduction des sulfates se manifeste à nouveau en milieu réducteur.

- Au niveau de la station centre, la réduction du fer et l'ammonification sont dominants en surface de 0 à -26 cm avec des valeurs de potentiel d'oxydo-réduction respectives de 200 et 400 mV. La réduction des sulfates se réalise à partir de – 38 cm en milieu réducteur.
- Dans la station bas-fond, la réduction des sulfates par les bactéries sulfato-réductrices s'effectue en surface de 0 à -8 cm en milieu réducteur ; suivie de la réduction du fer de -10 à -30 cm et enfin une réduction des sulfates en profondeur.

En saison sèche, les profils de la ZNS des stations centre de Mboro et Lompoul présentent un milieu oxydant en surface puis réducteur en profondeur donnant lieu à des réactions de réduction de fer en surface et en profondeur de sulfatogenèse. A la station de Potou centre c'est plutôt le phénomène inverse avec des réactions de sulfatogenèse jusqu'à -75 cm puis de réduction du fer le long des profils ZNS. Toutefois, le milieu est oxydant dans l'ensemble des trois stations versant avec des réactions de réductions de fer et d'ammonification.

Les zones réductrices en surface peuvent ainsi se corréliser aux tranches de sol riche en silts et en argiles, lieu préférentielle des réactions d'échanges de base avec le complexe argilo-humique. Ces processus sont associés à la fluctuation de la nappe humidifiant les sédiments et l'arrivée des eaux de surface (pluies, irrigation, eaux de ruissellement et/ou usées) au sein des dépressions ainsi que la forte action anthropique.

Le milieu oxydant va favoriser les réactions d'oxydation avec la libération des cations tels que le fer, le manganèse et l'aluminium. Le milieu réducteur en profondeur peut être causée par la remontée de la nappe phréatique contaminée par les sulfates, les nitrates et l'ammonium provoquant ainsi des processus de dénitrification, de nitrification et d'ammonification au niveau de la frange capillaire, zone de battement de la nappe en fonction de la recharge de celle-ci.

L'ensemble de ses processus chimiques et hydro-biogéochimiques sont la clé du fonctionnement de cet écosystème humide. Ces processus contribuent, à différents degrés, à la dégradation de la MO et à la minéralisation des eaux interstitielles le long de la ZNS et des eaux de la nappe du secteur des Niayes du Littoral Nord.

➤ **Typologie des Niayes du Littoral Nord**

Les Niayes du Sénégal et en particulier les trois sites pilotes ciblés (Mboro, Lompoul et Potou) sont propices aux activités maraîchères à des degrés différents en fonction des contraintes naturelles et

anthropiques le long de la côte Nord. On distingue ainsi des classes différentes de zones humides en fonction des caractéristiques spécifiques :

- La Niaye de Potou peut être considérée comme une prairie humide pouvant en fonction de la saison se transformer en marais saumâtre à salin saisonnier dans le bas-fond de la dépression.
- La Niaye de Lompoul met en évidence les particularités d'un marais saumâtre à salin saisonnier avec un taux élevé de matière organique et de tourbes en profondeur évoluant en hydrocarbures comme le gaz.
- La Niaye de Mboro peut représenter une lagune littorale avec autour des pratiques agricoles plus intensives sur le versant que dans le centre et le bas-fond de la Niaye. En effet, le plan d'eau dans le bas-fond de la Niaye reste permanent avec un volume qui peut varier en fonction des saisons, une colonisation importante de plantes hydrophiles tel que le *Typha latifolia* et une représentation à l'arrière-plan des cultures et tout autour de la Niaye des cocotiers et palmiers. Cette zone peut être considérée dans sa partie centrale à partir de 20 cm de profondeur comme une tourbière avec des taux de carbone atteignant plus de 85 %.

Par ailleurs, les zones humides peuvent être aussi classés selon les conductivités et salinités correspondantes (Wilson, 2015, Stewart & Kantrud, 1971). Ceci nous conduit à prétendre que les eaux des Niayes sont légèrement à modérément saumâtres avec des conductivités variant entre 978 et 3710 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (cf. Tableau 1) et un flux hydrique saisonnier temporaire à permanent variable du Nord au Sud de la côte Nord. Cependant, ce paramètre ne permet pas de bien différencier les caractéristiques typiques de chaque Niaye. L'accumulation et la dégradation de la matière organique ainsi l'ensemble des processus biogéochimiques et isotopiques sont donc des paramètres clés qui ont aidé distinguer ces zones. Ainsi, la Niaye de Mboro est une zone humide à matière organique biodégradable, Lompoul une zone humide à matière organique oxydée et Potou une zone humide à matière organique minéralisée.

Aussi, ces zones humides sont influencés par différents facteurs avec des processus et caractéristiques incluant les conditions climatiques, hydrologiques, hydrogéologiques et environnementales (ESRD, 2014, National Wetlands Working Group 1997, Vitt et *al.*, 1996):

- les processus hydrologiques avec la capacité à recevoir, accumuler, modérer et relarguer dans les eaux de surface et souterraines d'un bassin versant.
- les processus biogéochimiques comme les réactions acides-bases, échange d'ions et les réactions d'oxydo-réduction, la décomposition de la MO, le cycle des nutriments (azote, phosphore) et la séquestration du C et N
- les processus biotiques tels que la productivité biologique et la biodiversité dans l'écosystème.

DISCUSSIONS

De plus, la présence de plantes invasives dans les zones humides contribue à une augmentation des stocks de carbone et d'azote en fonction du type d'espèces, de la diversité biologique et de sa biomasse (Martina et al., 2014). En effet, dans les Niayes, les *Typha* principalement le *Typha Latifolia*, est l'espèce hydromorphe la plus répandue. Elles forment des prairies touffues au centre des zones bas-fonds inondées tandis que les espèces *Phragmites* tel que *Phragmites australis* se répartissent généralement sur les pourtours plus ou moins humides des dépressions. L'espèce *Cyperus* peut se développer autant dans la zone inondée que sur les bordures asséchées des Niayes. Grâce à l'outil isotopique $\delta^{13}\text{C}$, on a pu déterminer que l'espèce *Typha* est toujours plus appauvrie en carbone que l'espèce *Phragmites*. Ceci peut être dû à la zonation écologique des espèces lacustres (Fall, 1996). Ainsi, cette zonation est très dépendante de l'humidité des sols et influence le stock de carbone que peut générer ces écosystèmes humides. Ce résultat confirme donc le fait que la station centre de la Niaye de Mboro est la plus riche en stock de carbone par rapport la zone bas-fond inondée.



Conclusion générale

Les zones humides du Littoral Nord présentent un intérêt particulier dans le développement socio-économique du Sénégal. La préservation de ses ressources naturelles principalement la qualité de l'eau et des sols est la clé du maintien de sa biodiversité et de l'amélioration des rendements agricoles. L'originalité de ce travail a été de faire une étude comparative de trois zones humides (Mboro, Lompoul et Potou) situées respectivement au Sud, centre et Nord du secteur afin de comprendre le fonctionnement hydrogéochimique et sédimentaire des Niayes ainsi que de déterminer s'il y a ou pas une régionalisation de ce fonctionnement dans tout le secteur. Ce travail a été réalisé à deux échelles dont la première régionale pour comprendre la variabilité spatiale et saisonnière du niveau et de l'hydrochimie de la nappe qui alimente ses Niayes en fonction des saisons et la seconde locale pour étudier les processus géochimiques au niveau des sites pilotes ciblés. Cette étude a donc visé à évaluer la disponibilité en eau dans le sol et déterminer les processus hydrogéochimiques qui affectent les Niayes du Littoral Nord au Sénégal. Elle a permis ainsi d'évaluer quantitativement et qualitativement de la ressource en eaux souterraines dans le secteur d'une part ; et d'autre part comprendre le fonctionnement hydrogéochimique et sédimentaire de l'écosystème des Niayes.

❖ Evaluation quantitative et qualitative de la nappe du Littoral Nord

Le secteur d'étude est caractérisé par un climat de type soudano-sahélien à sahélien avec des précipitations variant de 447 à 258 mm de 1976 à 2012 suivant un gradient décroissant du Sud au Nord. La géomorphologie de la région est constituée d'une succession de dunes, et d'inter-dunes localement appelés « Niayes ». De plus, la nappe est contenue dans les sables quaternaires qui reposent sur un substratum marno-calcaire et dont le potentiel hydrique se renouvelle essentiellement par les eaux pluviales. La piézométrie présente un dôme dans la partie Sud-Ouest s'allongeant jusqu'à la latitude de Louga avec un sens d'écoulement divergent vers les Niayes et l'océan à l'Ouest, et les calcaires lutétiens à l'Est.

Ainsi, les eaux souterraines du Littoral Nord présentent une fluctuation interannuelle et saisonnière avec un gradient décroissant en fonction du temps sur l'ensemble de la zone. Cette baisse est progressive et faible dans la partie Sud, rapide dans la partie centre. Au Nord, le niveau piézométrique est proche du niveau marin et très marquée par les variabilités saisonnières. Sur le flanc Est, la partie centre du Littoral Nord renferme la plus importante disponibilité en eaux souterraines avec un niveau piézométrique de plus de 10 m en moyenne vers Nguer Nguer. Aussi, la recharge est estimée en moyenne à 11,9 mm/an soit 3,2 % des précipitations annuelles. La zone Sud est plus réalimentée que les zones centre et Nord. De plus, la recharge de la nappe a été plus importante en 2012 qu'en 2011 dû principalement à une meilleure pluviométrie. Le bilan

hydrologique calculé de 1981 à 2013 par la méthode de Thornwaithe évalue les taux d'infiltration à 44, 4 et 3 mm respectivement dans les compartiments Sud, Centre et Nord du Littoral Nord. A l'échelle régionale, le régime du fonctionnement de la nappe est caractérisé par une dynamique baissière depuis les années 70 variant de 0,72 à 3,65 m sur 33 ans. Cette nappe est ainsi plus sollicitée que réalimentée avec un déficit toujours croissant.

De plus, l'analyse à l'aide des outils géostatistiques a démontré qu'il existe une variabilité spatiale et saisonnière de l'hydrochimie de ses eaux souterraines. En effet, quatre familles chimiques se distinguent ainsi que leurs faciès spécifiques généralement Ca-SO₄, mixte-Cl/SO₄, Na-Cl, mixte-Cl et mixte-HCO₃. Cette variabilité de l'hydrochimie a mis en évidence une similarité des processus pendant les deux saisons sèches avec son optimum de minéralisation. En saison humide, la même tendance est mise en évidence avec des eaux plus ou moins minéralisées en fonction des sites. Des eaux très diluées sont présentes en mi-saison sèche certainement dû à une arrivée d'eau massive causée par une recharge maximale différée de la nappe. La distribution des familles chimiques répond aussi à une répartition spatiale avec un secteur centre et Nord peu minéralisé et un secteur Sud très minéralisé. Cette répartition joue ainsi un rôle déterminant dans la minéralisation et les processus hydrogéochimiques influençant la qualité chimique de ces eaux souterraines. Les processus de minéralisation sont liés à des phénomènes naturels et/ou anthropiques en fonction des sites. Aussi, la zone Ouest de la bande côtière est riche en éléments mineurs et traces (Fer, Manganèse et Aluminium) alors que la zone Est présente de faibles teneurs. Le taux de salinisation des eaux souterraines varie entre 0,1 et 3,2 % mettant en évidence une zone Nord plus affectée par l'intrusion saline. Ces faibles teneurs se justifient par la présence du dôme sur l'axe Thiès-Kebemer-Louga qui a tendance à repousser les eaux salées vers les dépressions et la mer à l'Ouest et les calcaires lutétiens à l'Est. Cependant, d'autres processus tels que l'évaporation, l'échange des ions, la dissolution et altération des roches, l'hydrolyse des minéraux argileux, la dissolution du CO₂ de l'air et des sols contribuent considérablement à l'acquisition de la minéralisation des eaux de la nappe.

Par ailleurs, la signature isotopique montre que la recharge se fait principalement par infiltration directe des eaux de pluie par effet « piston-flow ». Les eaux de la nappe ont une signature isotopique plus enrichie que celles des pluies beaucoup plus en saison sèche qu'en saison humide. Aussi, ces eaux subissent ainsi un fractionnement isotopique par évaporation plus ou moins important en fonction de la position géographique, la température, l'effet de continentalité et de masse. Ceci est accompagné de processus de circulation active des eaux souterraines et de mélange des eaux influençant ainsi la qualité chimique de cette ressource.

De plus, les teneurs en D-excess ont mis en évidence les phénomènes d'évapotranspiration et d'une humidité ré-évaporée dans les zones agricoles des Niayes principalement à Mboro. La variabilité

des teneurs en tritium a conduit à la détermination des tranches d'âge dans la nappe avec une zone centre à Nord-Est ayant des teneurs inférieures à 0,7 UT suggèrent des eaux anciennes de plus 50 ans ; une zone centre à Nord-Ouest, Sud-Est et Sud-Ouest (0,8 - 1,8 UT) présentent des âges entre 50 et 35 ans et des sites particuliers au Sud avec des valeurs supérieures à 1,8 UT peuvent enregistrer des âges entre 0 et 35 ans.

Ainsi, la nappe du Littoral présente des taux d'infiltration plus importants dans le secteur Sud par rapport au secteur Nord. Cependant, les eaux sont plus minéralisées dans le secteur Ouest par rapport au secteur Est de la côte Nord.

❖ **Fonctionnement Hydrogéochimique de l'écosystème des Niayes**

Les zones humides du Littoral Nord présentent des caractéristiques sédimentaires et hydrogéochimiques variables en fonction du site, de la position dans la dépression et des saisons. En effet, les sols sont généralement silteux à sablo-silteux dans la zone Sud et silto-sableux à sableux dans la zone Nord en saison sèche. Les minéraux argileux sont dominés par la Kaolinite généralement associée à l'Illite. Ce cortège enregistre des minéraux inter-stratifiés (Vermiculite-Smectite, Vermiculite-Chlorite) principalement en surface sur le site de Mboro. Les teneurs en matières organiques particulières variant entre 0 et 36 % sont plus importantes dans les Niayes de Lompoul et Mboro par rapport à Potou. Cette matière organique est riche en hydrocarbures à Mboro, évoluée à Lompoul et minéralisée à Potou. Ainsi, la Niaye de Potou est considéré comme une « source » de carbone, celles de Lompoul et Mboro à la fois comme « puit et source » de carbone.

Ces zones humides présentent une forte capacité de rétention d'eau dans le sol principalement dans les secteurs Sud et centre par rapport au secteur Nord de la grande côte. Les sols de Mboro sont plus saturés en saison sèche ; et ceux de Lompoul en saison humide avec des teneurs plus importantes en profondeur. Cette étude a montré aussi une variabilité spatiale et saisonnière de l'hydrochimie des eaux interstitielles le long de la zone non saturée. Elle met en évidence des eaux plus minéralisées dans les stations versants que les stations centres des dépressions. Ceci est plus prononcé en surface qu'en profondeur. En saison sèche, les fortes concentrations chimiques se localisent dans la Niaye de Lompoul et en saison humide, la Niaye de Potou présente une minéralisation largement plus importante. La zone de Mboro présente la plus faible minéralisation des eaux interstitielles quelque soit la saison.

Par ailleurs, les eaux de la nappe au niveau des zones humides montrent un pic de salinité plus marqué à Potou qu'à Lompoul au cours de la saison sèche. Ces valeurs sont plus faibles à Mboro avec un pic déplacé vers la saison humide. Ce changement peut se justifier par la lithologie des sols plus silteux qui a tendance à freiner l'infiltration et accumuler l'eau et des solutés dans la zone non

saturée induisant la recharge différée de la nappe. Une corrélation peut donc être mise en évidence entre la qualité des eaux interstitielles et la chimie de la nappe en fonction de la saison, du type de sol et de l'épaisseur de la ZNS.

Aussi, les apports en éléments nutritifs présentent une variabilité différente au sein des trois Niayes. En effet, la Niaye de Mboro est la plus riche en phosphates. Celle de Potou renferme les teneurs les plus importantes en carbone organique dissous et en ammonium. La Niaye de Lompoul montre des valeurs intermédiaires pour l'ensemble de ces éléments chimiques. Ces apports nutritifs peuvent être issus de l'utilisation des engrais chimiques et fertilisants, des détritiques de végétaux et animaux, des rejets industriels et domestiques, de la dissolution de roche et minéraux, de la dégradation de la matière organique par minéralisation et de l'activité microbienne.

Cette étude a ainsi permis déterminer les types de zones humides du secteur. La Niaye de Mboro peut être considérée comme une lagune littorale, celle de Lompoul comme un marais saumâtre à salin saisonnier. La Niaye de Potou représente une prairie humide très arrosée par la nappe sur le versant pouvant en fonction de la saison se transformer en marais saumâtre à salin saisonnier dans le bas-fond. Ces trois Niayes sont caractérisées par des pratiques intensives agricoles. Celles-ci sont plus importantes dans la Niaye de Mboro associées à une végétation naturelle luxuriante du fait à la faible minéralisation des eaux et de ses sols très fertiles et riches en éléments nutritifs. Le versant de Potou bien que très minéralisé est une zone très productive principalement dans la culture de l'oignon qui s'effectue par jachère. La Niaye de Lompoul présente de faibles surfaces de cultures et de façon parsemée dues à la forte minéralisation des eaux principalement dans la station centre. Ces résultats ont donc permis de montrer que les Niayes Mboro, Lompoul et Mboro présentent des caractéristiques spécifiques à chacune d'elles. Celles-ci sont variables en fonction de la position dans la dépression, des conditions intrinsèques du site et des saisons. Il n'y a donc pas de régionalisation du fonctionnement hydrogéochimique de l'écosystème des Niayes.

L'étude particulière du site de Mboro en saison humide a montré une variabilité saisonnière de la distribution granulométrique par rapport à la saison sèche. Ceci peut être dû aux particules fines en suspension induites par la remontée de la nappe qui se décantent de façon hétérogène entraînant un dépôt plus important sur le versant et au centre que dans le bas-fond de la Niaye. Ces sédiments sont généralement saturés en eau en profondeur et enregistrent une porosité moyenne de 0,8 à 0,9. Ils ont des teneurs de phosphore et fer totaux plus importantes en surface et diminuant en fonction de la profondeur. La station versant est la plus riche en phosphore particulaire total alors la station bas-fond concentre plus de fer total. Ceci peut être dû à la forte utilisation d'engrais pour améliorer les rendements agricoles sur le versant alors que la zone bas-fond par lessivage des sols et ruissellement des eaux usées accumulent des éléments chimiques dans le fond de la dépression. Toutefois, le phosphore minéral est dominant et lié majoritairement au fer.

Aussi, la présence de Pyrite framboïdale participe à la minéralisation de la matière organique et à l'acidification du milieu. Cette espèce favorise les échanges de base avec la fixation du fer sur le complexe argilo-humique. Les processus de dissolution et formation de la Pyrite au sein de la zone humide de Mboro influencent ainsi la chimie des eaux interstitielles. En effet, ils contribuent à l'augmentation des teneurs en sulfates et en fer dans les parties superficielles des profils de ZNS.

Les processus géochimiques identifiés au sein de cette Niaye sont principalement la réduction des sulfates à l'aide des bactéries sulfato-réductrices sur les stations versant et bas-fond, la réduction du fer et les processus d'ammonification pour l'ensemble des trois stations. Par ailleurs, la quantification des flux des nutriments à l'interface eau-sédiment enregistre pour le phosphore des taux les plus importants dans les stations centre et versant (4,7 et 3,2 mmol/m /j respectivement) par rapport à la station bas-fond (8.10^{-2} mmol/m /j) de la Niaye de Mboro. Par contre, les flux d'échange de l'ammonium sont plus élevés dans le bas-fond ($2. 10^{-3}$ mmol/m /j) de la dépression.

Aussi, la matière organique à Mboro autant en saison sèche qu'en saison humide est caractérisée par deux phases : une première phase d'accumulation dans les parties supérieures des profils ZNS suivie d'une phase de minéralisation et relargage en profondeur. Elle présente une station centre plus enrichie en carbone organique particulaire essentiellement de 20 à 60 cm de profondeur par rapport aux stations versant et bas-fond. Sa source est principalement algale issue de la production primaire du milieu. Elle peut aussi provenir des détritiques de végétaux (litière) et des sols de cet écosystème ainsi que de l'activité bactérienne. La forte accumulation de MO dans la station centre peut se aussi justifier par le phénomène de relargage et dépôt hétérogène des constituants organiques après la saison des pluies. De plus, la remontée de la nappe par la station bas-fond peut repousser ces substances organiques vers la station centre qui après accumulation se dégradent en profondeur. Par ailleurs, la géochimie isotopique a montré que les composés organiques sont issus d'un couvert végétal composé de plantes à cycle photosynthétique C3 avec une signature $\delta^{13}\text{C}$ moyenne de -25 ‰. Aussi, les teneurs en isotope $\delta^{15}\text{N}$ varient entre - 1 et + 6 ‰. Ceci peut indiquer des sources d'azote provenant d'une part de l'ammonium des sols associé à un phénomène de dénitrification et d'autre part l'ammonium issu des fertilisants et engrais chimiques très utilisés pour améliorer le rendement agricole. L'analyse géochimique a permis d'estimer les ratios C/N qui varient de 16 à 19 en surface et 44 à 29 en profondeur avec en moyenne 27, 33 et 27 respectivement aux stations MB1, MB2 et MB3 confirmant un taux de matière organique ensevelie et stockée dans la zone centrale de la dépression plus importante alors que la biodisponibilité de l'azote est relativement faible car directement assimilé par les micro-organismes et végétaux.

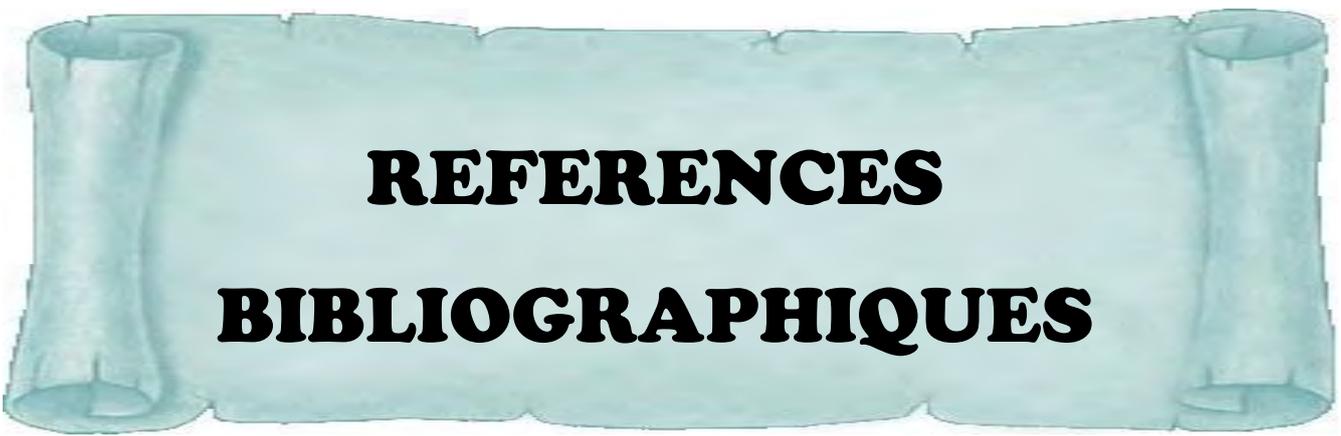
Cette analyse à fine échelle a donc montré selon la position un comportement hydrogéochimique différent de la Niaye de Mboro. Elle présente ainsi une zone versant très minéralisée riche en éléments nutritifs, une zone centrale très riche matière organique particulaire et une zone bas-fond

très dépendante de la fluctuation de la nappe influencée par les particularités de la zone centrale en surface et du versant en profondeur confirmant ainsi les hypothèses de variabilité spatio-temporelle à l'échelle locale et régionale du Littoral Nord du fonctionnement hydrogéochimique des zones humides.

➤ **Perspectives**

Cette étude constitue ainsi une importante contribution à l'évaluation spatiale et temporelle, qualitative et quantitative des ressources en eaux souterraines et interstitielles dans le secteur du Littoral Nord. Elle a aussi permis de cerner les caractéristiques sédimentologiques et de déterminer les processus hydrogéochimiques le long de la zone non saturée. Ces processus sont les réactions chimiques et biogéochimiques avec la dégradation de la matière organique ainsi que les flux de nutriments à l'interface eau-sédiment. Ces différents facteurs ont permis d'émettre des hypothèses sur le fonctionnement de cet écosystème humide le long de la côte Nord. Cependant, il convient de poursuivre ces investigations pour assurer une gestion efficace des ressources en eaux et une protection de ses zones humides agricoles. C'est ainsi qu'il sera judicieux dans les recherches futures de :

- faire un suivi régulier et permanent de la qualité de la nappe et de l'eau des Niayes
- déterminer la sédimentologie et la minéralogie le long de la zone non saturée sur l'ensemble des Niayes représentatives de la côte Nord sur un pas d'intervalle inférieur ou égal à 5 cm.
- élargir à l'ensemble des Niayes l'étude du fonctionnement hydrogéochimique à fine échelle comme réalisé à Mboro en y associant les types de cultures favorables en fonction de la minéralisation des eaux de chaque site pouvant aider les agriculteurs au choix du type de plantes en fonction des zones et des saisons. Ceci pour améliorer considérablement leur productivité.
- d'évaluer les processus de formation et de minéralisation de la Pyrite dans les Niayes
- modéliser le transport de solutés tels que les contaminants dans la zone non saturée afin de préserver sur le long terme les ressources naturelles de cet écosystème.
- approfondir les recherches en Hydrocarbures dans le secteur de Lompoul. En effet, la découverte de tourbe évoluée et surtout de gaz (méthane et/ou sulfure d'hydrogène) dans les carottes à Lompoul peuvent être un indicateur de gisement en gaz et même de pétrole sur le long terme et contribuer à l'essor de l'économie du Sénégal.



REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adam, J. G., (1965) Généralités sur la flore et la végétation du Sénégal. Etudes Sénégalaises, Publ. C.R.D.S., St-Louis, Connaissance du Sénégal, N° 9, fasc. 3, 155-214.
- Alberta Wetland Policy (2013) Environment and Sustainable Resource Development. Report ISBN: 978-1-4601-1286-1, 26 p.
- Alcala and Custodio (2008) Using the Cl/Br ratio as a tracer to identify the origin of salinity in aquifers in Spain and Portugal *Journal of Hydrology*, 359, 189–207.
- Allison, G.B. and Hughes, M.W., (1983) The use of natural tracers as indicators of soil-water movement in a temperate semi-arid region. *Journal of Hydrology*, 60, 157-173.
- Allison, G.B. and Hughes, M.W., (1978) The use of environmental chloride and tritium to estimate total recharge to an unconfined aquifer. *Australian Journal of Soil Research*, 16, 181-195.
- ANDS - Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie (2014) Rapport général de la population et de l'habitat, de l'agriculture et de l'élevage 2013, UNFPA, USAID 19 p.
- Anderson, J. K., Wondzell, S. M., Gooseff, M. N., Haggerty, R. (2005) Patterns in stream longitudinal profiles and implications for hyporheic exchange flow at the H. J. Andrews Experimental Forest, Oregon, USA, *Hydrological Processes*, 19, 2931–2949.
- Andreasen, D.C., & Fleck, W.B., (1997) Use of bromide/chloride ratios to differentiate potential sources of chloride in a shallow, unconfined aquifer affected by brackish-water intrusion. *Hydrogeology Journal* 5, N°2: 17–26.
- Aguiar L. A. A., (2009) Impact de la variabilité climatique récente sur les écosystèmes des Niayes du Sénégal entre 1950 et 2004 – Université du Québec à Montréal 185 p.
- Alther, G. A., (1979) A simplified statistical sequence applied to routine water quality analysis: A case history; *Groundwater*, 17, 556–561.
- Appelo, C.A.J., Postma, D., (2005) *Geochemistry Groundwater and Pollution*, second ed. A.A. Balkema 668 p.
- Ashley, R. P., & Lloyd, J. W., (1978) An example of the use of factor analysis and cluster analysis in groundwater chemistry interpretation. *Hydrology Journal*, 39 (3–4), 335–364.
- Aranyossy, J.F., (1991) L'apport des techniques isotopiques à l'étude de la recharge des aquifères sous contraintes techniques et climatiques extrêmes. Diplôme d'habilitation à diriger des recherches en Sciences, Université Paris Sud (Orsay), 576 p.
- Aranyossy, J.F., Gaye, C.B., (1992) La recherche du pic du tritium thermonucléaire en zone non saturée profonde sous climat semi-aride pour la mesure de la recharge des nappes: première application au Sahel. *Hydrogéologie*, C. R. Acad. Sci. Paris, t. 315, Série II, p. 637-643.

- Barnes, C.J., & Allison, G.B., (1983) The distribution of deuterium and oxygen-18 in dry soils: I. Theory, *Hydrology Journal*, 60, 141-156.
- Barnes, C.J., and Allison G.B., (1988) Tracing of water movement in the unsaturated zone using stable isotopes of hydrogen and oxygen. *Hydrology Journal*, 100, 143-176.
- Barousseau, J.P., (1980) Essai d'évaluation des transports littoraux sableux sous l'action des houles entre Saint-Louis et Joal (Sénégal). *Bulletin de Liaison, ASEQUA*, n°58-59, 39-61.
- Belkhiri, L., Boudoukha, A., Mouni, L., Baouz, T., (2011) Statistical categorization geochemical modeling of groundwater in Ain Azel plain (Algeria). *Journal of African Earth Sciences* 59, 140–148.
- Bellion, Y., (1987) Histoire géodynamique post-paléozoïque de l'Afrique de l'Ouest d'après l'étude de quelques bassins sédimentaires (Sénégal, Taoudeni, Iullemeden, Tchad). Thèse d'Etat, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 302 p.
- Berner, R. A., (1980) *Early diagenesis: A theoretical approach* Princeton University Press, Princeton, NJ. 256 p.
- Birke, M., & Rauch, U., (1993) Environmental aspects of the regional geochemical survey in the southern part of east Germany. *Journal of Geochemical Exploration* 49 (1–2), 35–61.
- Bodian A., (2014) Caractérisation de la variabilité temporelle récente des précipitations annuelles au Sénégal (Afrique de l'Ouest). *Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement*, volume VIII.
- Bonzongo, J., Bertru, G., Martin G., (1989) Les méthodes de spéciation du phosphore dans les sédiments: Critiques et propositions pour l'évaluation des fractions minérales et organiques, *Archiv fur Hydrobiologie*, vol. 116, 61- 69.
- Bouillon, S., Dehairs, F., Schiettecatte, L.S., Borges, A.V., (2007) Biogeochemistry of the Tana estuary and delta (northern Kenya). *Limnology and Oceanography*, 52, 46–59.
- Böstrom ,B., Andersen J.M., Fleischer S., Jansson M. (1988) Exchange of phosphorus across the sediment–water interface, *Hydrobiologia*, vol. 170, 229–244.
- Bowen, G.J., Revenaugh, J., (2003) Interpolating the isotopic composition of modern meteoric precipitation. *Water Resources Research*, 39, 1299.
- B.R.G.M., (1992) Réévaluation de la ressource en eau du littoral Nord du Sénégal. Synthèse des données. Modification hydrodynamique et simulations prévisionnelles. Service sol et sous-sol. 54p. + annexes.
- B.R.G.M, (1967) - Etude géochimique des eaux souterraines de l'Afrique de l'Ouest. Bilan hydrogéologique des nappes de Thiaroye et Malika par la méthode des chlores (Sénégal). Publication Comité Inter-africain d'études hydrauliques, DAK 67 - A 12.

- Brown, C.E., (1998) Applied multivariate statistics in geohydrology and related sciences. Springer, Berlin, 248 p.
- Brunaud, D. C., (2007) Les sédiments fins dans un écosystème macro-tidal actuel (Continuum Seine – Baie de Seine): Caractérisation géochimique et minéralogique, identification des sources. Thèse de Doctorat Université de Rouen 314 p.
- Burdige D.J., (2006) Geochemistry of Marine Sediments. Princeton University 624 p.
- Carrie J., Sanei H., Stern G., (2012) Standardisation of Rock–Eval pyrolysis for the analysis of recent sediments and soils. *Organic Geochemistry* 46, 38–53.
- Casellas, C., Pena, G., Picot, B., Illes, S., Bontoux, J., (1990) Nutrients in Thau Lagoon: grouping of contiguous geographical zones. *Water Research* 24 (12), 1479-1488.
- Castelain, J., Jardine, S., Monciardini, C., (1965) Excursions géologiques dans le Sénégal Occidental. *Mém. BRGM, Paris*, 32, 357- 372.
- Charfi, S., Zouari, K., Feki S., Mami, E. (2013) Study of variation in groundwater quality in coastal aquifer in north-eastern Tunisia using multivariate factor analysis *Quarter. Int. J.* 302, 199-209.
- Castany, G., (1982) - Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Dunod, Paris. 238 p.
- Charreau, C., Fauck R., (1965) Les sols du Sénégal. *Etudes Sénégalaises, Publ. C.R.D.S., St-Louis, Connaissances du Sénégal, n°9, Fasc.3*, 111-154.
- Cissé, I., Fall, S. T., Badiane, M., Diop, Y. M., Diouf, A. (2006) Horticulture et usage des pesticides dans la zone des Niayes, ISRA/LNERV, EISMV, LACT / Faculté de Médecine Pharmacie / UCAD, document de travail Ecocité 8, 14 p.
- Chamley, H., (1971) Recherche sur la sédimentation argileuse en Méditerranée. *Sciences Géologiques* 35, 209 p.
- Chateaufeuf, J.J., Pezeril, G., (1984) Nature et mode de formation de la tourbe - Projet d'exploitation des tourbes des Niayes - BRGM, p. 6-89.
- Chino, A., (1962) Sédimentation phosphatée au Sénégal. Première campagne. Etablissement d'une échelle stratigraphique. *Rapp.inéd. B.R.G.M., DAK 62-A-1*.
- Chkirbene, A., Tsujimura, M., Charef, A., Tanaka, T. (2009) Hydro-geochemical evolution of groundwater in an alluvial aquifer: Case of Kurokawa aquifer, Tochigi prefecture, Japan. *Desalination*, 246, 485-495.
- Chkir, N., Trabelsi, R., Bahir, M., Hadj Ammar, F., Zouari, K., Chamchati, H., Monteiro, J.P., (2008) Vulnérabilité des ressources en eaux des aquifères côtiers en zones semi-arides – Etude comparative entre les bassins d'Essaouira (Maroc) et de la Jeffara (Tunisie). *Comunicações Geológicas*, 95, 107-121.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Chow, V.T., 1964: Handbook of applied hydrology: A compendium of water-resources technology, McGrawHill, New York, 1493 p.
- Clark, I.D., & Fritz, P., (1999). Environmental Isotopes in Hydrogeology. Lewis Publishers, Boca Raton. 311 p.
- Cloutier, V., Lefebvre, R., Therrien, R., Savard, M. (2008) Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. Hydrology Journal. 353, 294–313.
- Coleman, M. L, Shepherd T. J., Durham, J.J., Rouse, J.E., Moore, G.R., (1982) Reduction of water with zinc for hydrogen isotope analysis. Analytical Chemistry 54, 993–995.
- Copard, Y., Di-Giovanni, C., Martaud, T., Albéric, P., Ollivier, J. E., (2006) Using Rock-Eval 6 pyrolysis for tracking fossil organic carbon in modern environments: implications for the roles of erosion and weathering. Earth Surface Processes and Landforms, 31, 135-153.
- Coplen, T.B., (1988) Normalization of oxygen and hydrogen isotope data. Chemical Geological: Isotope Geoscience Section, 72, 293–297.
- Craig, H., (1961) Isotope variations in meteoric water. Science 133, 1702–1703.
- Davis, S.N., Whittemore, D.O., Fabryka-Martin, J. (1998) - Use of Chloride/Bromide ratios in studies of potable water. Ground Water, 36: 338-350.
- Dansgaard W., (1964) Stable isotopes in precipitation. Tellus 16: 436–468.
- Dassargues. A., (2006) Caractérisation des nappes aquifères : une nécessité pour leur gestion et leur protection. Jeudis de l'aquapôle, Université de Liège (Ulg/Belgique) 10 p.
- Davis, S.N., D.J. Campbell, H.W. Bentley, and T.J. Flynn. (1985) Ground Water Tracers. Dublin, Ohio: National Water Well, Worthington, Ohio. pp. 200.
- Davis, S.N., Whittemore D.O., Fabryka-Martin J. (1998) Uses of chloride/bromide ratios in studies of potable water. Ground Water 36, no. 2: 338–350.
- Diaw, A.T., (1997) Evolution des milieux littoraux du Sénégal. Géomorphologie et Télédétection. Thèse de Doctorat d'Etat ès Lettres, Université de Paris I / Panthéon Sorbonne, Paris, 270 p.
- Degallier, R., (1962) Prospection Hydrogéologique de l'alimentation en eau de Dakar: Les ressources en eau de la presqu'île du Cap Vert. Terres et Eaux, 39, 3-16.
- De Groot C.J, Golterman H.L. (1993) On the presence of organic in some phosphate Camargue sediment: evidence for the importance of phytate, Hydrobiologia, vol. 252, pp. 117-126.

- De Montigny, C., Prairie, Y., Boers, P., Cappenberg, T., Van Raaphorst, W., (1993) The relative importance of biological and chemical processes in the release of phosphorus from a highly organic sediment. *Hydrobiologia* 253, 141-150.
- De Vries, J. J., Simmers, I., (2002) Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal* 10, 8–15.
- Demlie, M., Wohnlich, S., Gizaw, B., Stichler, W., (2007) Groundwater recharge in the Akaki catchment, central Ethiopia: evidence from environmental isotopes ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ and ^3H) and chloride mass balance. *Hydrological Processes*, 21, 807–818.
- Diedhiou, M. (2011) Approche multitraceur géochimique et isotopique à l'identification des sources de la pollution nitratée et des processus de nitrification et dénitrification dans la nappe de Thiaroye. Thèse de doctorat unique, Univ. Cheikh Anta Diop de Dakar, 210 p.
- Dieng, B. (1987) Paléohydrogéologie et hydrogéologie quantitative du bassin sédimentaire du Sénégal. Essai d'explication des anomalies piézométriques observées. Thèse d'Université, Ecole Nationale Supérieure de Mines, Paris, 172 p.
- Di-Giovanni, C., Disnar, J.R., Bichet, V., Campy, M., Guillet, B., (1998) Geochemical characterization of soil organic matter and variability of a past glacial detrital organic supply (Chaillexon Lake, France). *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, 1057-1069.
- Diouf O. C., (2012) Apport des outils cartographiques et géochimiques à la validation des paramètres d'entrée du modèle hydrogéologique de la nappe des sables quaternaires de Dakar : implication sur les inondations en zone péri-urbaine. Thèse de 3^{ème} cycle. Université Cheikh Anta Diop Dakar. 248 p.
- Direction des Etudes hydrauliques - D.E.H. - (1974-1990) Contrôle piézométrique et hydrochimique des nappes souterraines du Sénégal. Notes d'information annuelle. Dakar, 23 - 48 p. + annexes.
- Dragon K. and Gorski J. (2015) Identification of groundwater chemistry origins in a regional aquifer system (Wielkopolska region, Poland) *Environement Earth Sciences* 73, 2153 - 2167.
- Disnar J.R., Guillet B., Keravisa D., Di-Giovanni C., Sebag D. (2003) Soil organic matter (SOM) characterization by Rock-Eval pyrolysis: scope and limitations *Organic Geochemistry* 34, 327–343.
- Dong, P. (2008): Generating and updating multiplicatively weighted Voronoi diagrams for point, line and polygon features in GIS, *Computers and Geosciences*, 34, 411 - 421.
- Dror G., Ronen D., Stiller M., Nishri A. (1999) Cl/Br ratios of lake Kinneret pore water and associated springs. *Hydrology Journal* 225, 130-139.

- Duce, R.A., & Hoffman, E. J. (1976). Chemical fractionation at the air–sea interface. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 4, 187–228.
- Duchaufour, P. (1972) *Processus de formation des sols. Biochimie et géochimie*. Centre Régional Recherche et Documentation Pédagogiques, Nancy. 187 p.
- DTGC (2007) *Cartes topographiques du Sénégal au 1/200 000 - Direction des Travaux Géographiques et Cartographiques*
- El Faid, S, (1999) *Etude géochimique et isotopique des transferts d'eau et de solutés dans la zone non saturée de la nappe des sables quaternaires de louga (Nord Sénégal) recharge et paléorecharge*. Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle, Département de Géologie, Université Cheikh Anta Diop - Dakar, 237 p.
- Edmunds, W.M. and Gaye, C.B. (1994) Estimating the spatial variability of the groundwater recharge in the Sahel using chloride. *Hydrology Journal*, 156, pp. 47-59.
- Edmunds W. M., Faye, S. and Gaye, C.B. (1992) Solute profiles in unsaturated quaternary sands from Senegal: Environmental information and water-rock interaction. *Proceeding of the 7th international Symposium on water-rock interaction. WRI-7/Park City/Utah/USA*. 719-722.
- Elouard P., (1967) *Eléments pour une définition des principaux niveaux du Quaternaire Sénégal-mauritanien (Plage à Arca senilis, Ogolien, Inchirien)*. *Bulletin ABEQUA*, 9, 6-20.
- Engel A., Piontek J., Grossart H-P, Riebesell U., Schulz K. G., Sperling M. (2014) Impact of CO₂ enrichment on organic matter dynamics during nutrient induced coastal phytoplankton blooms *Journal of Plankton Res.* 36(3): 641–657.
- Espitalié J., Deroo G., Marquis F. (1985a) *La pyrolyse Rock-Eval et ses applications, première partie*. *Revue de l'Institut Français du Pétrole* 40: 563-579
- Espitalié J., Deroo G., Marquis F. (1985b) *La pyrolyse Rock-Eval et ses applications, deuxième partie*. *Revue de l'Institut Français du Pétrole* 40: 755-784
- Etcheverry, D. (2002) *Valorisation des méthodes isotopiques pour les questions pratiques liées aux eaux souterraines. Isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène*. *Applied Geochemistry*, 6, 447- 464.
- Fall T. S., Fall A. S., Cissé I., Badiane A. , Fall C. A. et Diao M. B. (2000) *Intégration horticulture - élevage dans les systèmes agricoles urbains de la zone des Niayes (Sénégal)* *Bulletin de l'APAD* 19 *Les interactions rural-urbain: circulation et mobilisation des ressource* 18 p.

- Fall, M. (1996) Les isotopes $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ et $\delta^{13}\text{C}$ dans la matière organique des végétaux actuels et fossiles du Sénégal: Relation avec les facteurs climatiques actuels et contribution à la reconstitution paléohydrologique des tourbières holocènes des Niayes. Thèse d'Etat. Université Cheikh Anta Diop - Dakar. 170 p.
- Fall, M. (1986) Environnements sédimentaires quaternaires et actuels des tourbières des Niayes de la grande côte du Sénégal. Thèse de 3^{ème} cycle. Université Cheikh Anta Diop - Dakar 136 p.
- Fardeau, J.C., Dorioz, J. M., (2000) La dynamique du phosphore dans les zones humides. In: E. Fustec, J.C. Lefeuvre, Fonctions et valeurs des zones humides. Paris, DUNOD. pp. 143-159.
- Faye E., Dieng H., Bogaert J., Lejoly J. (2014) Dynamique de la flore et de la végétation des Niayes et du Bassin arachidier au Sénégal. *Journal of Agriculture and Environment for International Development* 108 (2): 191- 206.
- Faye, S., Gaye, C., B., Faye, A., Malou, R., (1992) Solute profile in unsaturated Quaternary sands from Senegal: Environmental information and water-rock interaction. *Water – Rock Interaction, Kharaka & Maest*, 1-5.
- Faye, S. (1995) Modélisation hydrodynamique de la nappe du Littoral Nord entre Cayar et Saint louis, Impact des futurs prélèvements sur l’approvisionnement de Dakar et ses environs Louis. Thèse 3^{ème} cycle, Département Géologie, Université Cheikh Anta Diop - Dakar, 101 p. + annexes.
- Faye, S., Gaye, C., B., Faye, A., Malou, R. (1997) Impact of additional exploitation on the Littoral aquifers in the North of Senegal. *Groundwater in the Urban Environment Problems, Processes and Management*, Balkema - Rotterdam, 1-5.
- Faye, S., Maloszewski P., Stichler W., Trimborn P., Faye S.C, and. Gaye C.B (2005) Groundwater salinization in the Saloum (Senegal) delta aquifer: minor elements and isotopic indicators. *Science of the Total Environment* 343, 243–259.
- Finlay, J.C., and Kendall, C., (2007) Stable isotope tracing of temporal and spatial variability in organic matter sources to freshwater ecosystems, Chapter 10, In: R.H. Michener and K. Lajtha (Eds.), *Stable Isotopes in Ecology and Environmental Science*, 2nd ed., Blackwell Publishing, pp. 283-333.
- Flicoteaux, R, Medus, J., (1980) Existence d'une lacune entre les termes marins du Paléogène et du Néogène du Sénégal Méridional démontrée par les microfaunes et les microflores. *Annales de Mines et de la Géologie*, Tunis 28, 193- 257.

- Ford, W.I., Fox, J.F., Rowe, H., (2015) Impact of extreme hydrologic disturbance upon the sediment carbon quality in agriculturally impacted temperate streams. *Ecohydrology* 8 (3), 438–449.
- Fogel, M.L. & Cifuentes, L.A. (1993) Isotope fractionation during primary production. In: *Organic Geochemistry* (Eds M.H. Engel & S.A. Macko), Plenum Press, New York pp. 73–94.
- Fontes, J. C., Edmunds (1989) The use of environmental isotope techniques in arid zone hydrology. A critical review. Technical Doc. In *Hydrology.*, UNESCO, Paris, 75 p.
- Fontes, J.Ch., Matray, J.M., (1993) Geochemistry and origin of formation brines from the Paris basin, France. 1. Brines associated with Triassic salts. *Chemical Geology* 109, 149-175.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A., (1979) Prentice Hall, Englewood, New Jersey. 604 p.
- Fritz, P., Fontes, J.C., (1980) Handbook of environmental isotope geochemistry, vol. 1. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam. 545 p.
- Gaye C. B., Edmunds W. M. (1996) Groundwater recharge estimation using chloride, stable isotopes and tritium profiles in the sands of northwestern Senegal, *Environmental Geology*, 27, 246-251.
- Gaye, C.B., Gelinas, P. Ouellet, M., Therrien, P. Faye, A. (1989) Groundwater planning and management in coastal areas. The case history of Dakar, Senegal. Recent advances in groundwater hydrology. Pub., American Institute of hydrology. Moore JE., Zaporozec A.A., Csallany S.c. and Varney T.C., eds, 238-245.
- Gaye, C.B. (1990) Etude isotopique et géochimique du mode de recharge par les pluies et de décharge évaporatoire des aquifères libres sous climat semi-aride au nord du Sénégal. Doctorat d'Etat, Département Géologie, Université Cheikh Anta Diop - Dakar, 280 p. + annexes
- Gachter, R. and Meyer, J. S., (1993) The role of microorganisms in mobilization and fixation of phosphorus in sediments. *Hydrobiologia* 253, 103-121.
- Gat, J.R., (1980) The isotopes of hydrogen and oxygen in precipitation. In: P. Fritz and J.-Ch. Fontes (Eds), *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, Vol. 1, The Terrestrial Environment., A. Elsevier, Amsterdam, pp. 21-48.
- Gat, J.R. (2005) Some Classical Concepts of Isotope Hydrology: Rayleigh Fractionation, Meteoric Water Lines, the Dansgaard Effects (Altitude, Latitude, Distance form Coast and Amount Effects) and d-Excess Parameter. In: Aggarawal, P.K., Gat, J.R. and Froehlich,

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- K.F.O., Eds., *Isotopes in the Water Cycle: Past, Present and Future of a Developing Science*, IAEA, Springer, 127-137.
- Giambastiani, B.M.S., Colombani, N., Mastrocicco, M., Fidelibus, M.D. (2013) Characterization of the lowland coastal aquifer of Comacchio (Ferrara, Italy): Hydrology, hydrochemistry and evolution of the system *Journal of Hydrology* 501, 35–44.
- GKW Consult (2009) *Projet Eau à Long Terme - Etudes Hydrogéologiques Complémentaires. Rapport Final Dakar et Littoral Nord* 58 p. + Annexes
- Golterman, H. & A. Booman, (1988) Sequential extraction of iron-phosphate and calcium phosphate from sediments by chelating agents. *Verh. Int. Verein. Limnol.* 23: 904-909.
- Gonfiantini, R., (1985) On the isotopic composition of precipitation in tropical stations. *Acta Amazonica* 15, 121–139.
- Goni, M.A., Monacci, N., Gisewhite, R., Ogston, A., Crockett, J., Nittrouer, C., (2006) Distribution and sources of particulate organic matter in the water column and sediments of the Fly River Delta, Gulf of Papua (Papua New Guinea). *Estuarine Coastal and Shelf Science* 69, 225–245.
- Gorodisky, A. (1955) Note sur les gisements de calcaire lacustre de la feuille Louga au 1/200.000. Rapport inédit Archives Direction Fédérale des Mines et Géologie A.O.F., Dakar.
- Gerritse, R.G., and R.J. George (1988) The role of soil organic matter in the geochemical cycling of chloride and bromide. *Journal of Hydrology* 101 (1-4): 83–95.
- Güler, C., Kurt, M., A., Alpaslan, M., Akbulut, C. (2012) Assessment of the impact of anthropogenic activities on the groundwater hydrology and chemistry in Tarsus coastal plain (Mersin, SE Turkey) using fuzzy clustering, multivariate statistics and GIS techniques. *Hydrology journal*, 414–415, 435–451.
- Güler, C., Thyne, G.D., McCray, J.E., Turner, A.K., (2002) Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal*, 10, 455–474.
- Gupta S. K. and Deshpande R. D. (2005) The need and potential applications of a network for monitoring of isotopes in waters of India *Current Science*, 88, No. 1, pp. 107-118
- Hadas, A., Sagiv, B., Haruvy, N., (1999) Agricultural practices, soil fertility management modes and resultant nitrogen leaching rates under semi-arid conditions. *Agricultural Water Management*, 42, 81–95.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Handley L.L., Austin A.T., Robinson D., Scrimgeour C.M., Raven J.A., Heaton T.H.E., Schmidt S., Stewart G.R. (1999) The $\delta^{15}\text{N}$ of ecosystem samples reflects measures of water availability. *Australian Journal of Plant Physiology* 26, 185–199.
- Hebrard, L. (1958) Aperçu sur les dépôts de minéraux lourds: ilmènite, rutile, zircon, ... des sables des plages et anciennes vallées du littoral d'Afrique occidentale française. Direction Fédéral des Mines et de la Géologie, Afrique Occidentale française, Dakar, 210 p.
- Hebrard L. & Elouard P. (1976) – Carte géologique à 1/20 000 et Notice explicative de la carte de Tiaroye (Presqu'île du Cap-Vert). Ministère du développement industriel et de l'environnement, Direction des Mines et de la Géologie, République du Sénégal, 35 p.
- Helena, B., Pardo, R., Vega, M., Barrado, E., Fernandez, J.M., Fernandez, L. (2009) Temporal evolution of ground water composition in an alluvial aquifer (Pisuerga River, Spain) by principal component analysis. *Water Resources*, 34, 807–816.
- Hesslein, R.H., (1976) An in situ sampler for close interval pore water studies. *Limnology and Oceanography* 21, 912-914.
- Hem, J. D., (1985) Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. U.S. Geol. Surv. Water-Supply Paper, 2254, 3rd edition, pp. 263.
- Hillaire-Marcel G. (1986) Isotopes and food. In *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, vol. 2, Fritz P, Fontes J Ch, (eds). Elsevier Science ; pp. 507–548.
- Höltzapffel T., (1985) Les minéraux argileux. Préparation. Analyse diffractométrique et détermination. *Société Géologique du Nord* 12, 136 p.
- Hubert P., Carbonnel J.P. et Chaouche A. (1989) Segmentation des séries hydrométéorologiques ; application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *J. Hydrology*, vol. 110, n° 3-4, p. 349-367.
- IDEV- ic ex SENEGROSOL / COWI (2011) Etude du projet de mise en œuvre du plan d'Action de Gestion Intégrée des Ressources en eau (2^{ème} Partie) Bilan diagnostique des Ressources en eau. Rapport Technique 21 p.
- IRD (1998) KhronoStat version 1.0. Logiciel, IRD, Montpellier
- Jin Z., Qin X., Chen L., Jin M., Li F., (2015) Using dual isotopes to evaluate sources and transformations of nitrate in the West Lake watershed, eastern China. *Journal of Contaminant Hydrology* 177-178, 64–75.
- Jones B. F., Vengosh A., Rosenthal E., Yechieli Y. (1999) Geochemical investigations. In: *Seawater intrusion in coastal aquifers: concepts, methods, and practices*. Kluwer, Dordrecht, the Netherlands, pp. 51–71.

- Kaba M., V. Mesnage, B. Laignel, I. Mall, C. Stumpp, P. Maloszewski, S. Faye (2016) Spatial and seasonal variability of groundwater hydrochemistry in the Senegal North Littoral aquifer using multivariate approach. *Environmental Earth Sciences Journal*, 75: 724.
- Kaba, M., (2009) Evaluation des zones potentielles de recharge de la nappe de thiaroye : approche cartographique par télédétection et systèmes d'informations géographiques Diplôme d'Etudes Approfondies, Département Géologie, Université Cheikh Anta Diop Dakar, 176 p.
- Kane, C.H., (1995) Contribution à l'étude hydrochimique de la nappe des sables quaternaires du Littoral Nord au Sénégal entre Kayar et Saint Louis. Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle, Département de Géologie, Université Cheikh Anta Diop Dakar, 162 p. + annexes.
- King, A.C., Raiber, M., Cox, E.M., (2014) Multivariate statistical analysis of hydrochemical data to asses alluvial aquifer - stream connectivity during drought and flood: Cressbrook Creek Queensland, Australia. *Hydrogeology Journal* 22, 481 -500.
- Kendall, C., Silva, S.R., Kelly, V.J., (2001) Carbon and nitrogen isotopic compositions of particulate organic matter in four large river systems across the United States *Hydrol. Process.* 15, 1301–1346.
- Keller, K., Morel, F.M., (1999) A model of carbon isotopic fractionation and active carbon uptake in phytoplankton. *Marine Ecology Progress Series* 182, 295–298.
- 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 hydroclimatiques. Notes de recherche, Laboratoire national de recherche sur les productions végétales (LNRPV), Dakar, Sénégal. 33 p.
- Kouzana, L., Ben Mamou, A., and Sfar Falfoul, M., 2008. Sea water intrusion and associated process: case of the Korba aquifer (Cap-Bon, Tunisia. *Journal of Surface Geosciences (Hydrology-Hydrogeology)*, 341, 21–35.
- Kristensen, E., Bouillon, S., Dittmar., T., Marchand, C., (2008) Organic carbon dynamics in mangrove ecosystems: A review. *Aquatic botany*, 89, 201-219.
- Leduc C., Tgupin J., Le Gal La Salle C. (1996) Estimation de la recharge de la nappe phréatique du Continental Terminal (Niamey, Niger) à partir des teneurs en tritium. *Géosciences de Surface / (Hydrogéologie-Hydrogéologie) Compte rendu Académie Sciences Paris*, 323, série II a, 599-605.
- Laaksoharjua, M., SkaErmana, C. and SkaErmanb, E. (1999) Multivariate Mixing and Mass Balance (M3) Calculations, a New Tool for Decoding Hydrogeochemical Information. *Applied Geochemistry*, 14, 861-871.

- Lai D. Y., (2014): Phosphorus fractions and fluxes in the soils of a free surface flow constructed wetland in Hong Kong. *Ecological Engineering*, 73, 73–79.
- Lallier-Vergès, E. & P Albéric, (1990) Optical and geochemical study of organic matter in present oxic sediments (equatorial North Pacific Ocean NIXO area). *Oceanologica Acta*, Vol. Spec. 10: 281– 291.
- Lallier-Vergès, E., A. Sifeddine, J. L. de Beaulieu, M. Reille, N. P. Tribovillard, P. Bertrand, T. Mongenot, N. Thouveny, J. R. Disnar & B. Guillet, (1993) Sensibilité de la matière organique aux variations climatiques du Tardi-Würm et de l'Holocène. Le lac du Bouchet (Haute Loire, France). *Bulletin de la Société Géologique France*, 164, 661–673.
- Lallier-Vergès, E., Perrussel, B.P., Disnar, J.R., Baltzer, F., (1998) The relationship between environmental conditions and the diagenetic evolution of organic matter derived from higher plant in a present mangrove swamp system (Guadeloupe, French West Indies). *Organic Geochemistry*, 29, 1663-1686.
- Lafargue, E., Marquis, F., Pillot, D., (1998) Rock-Eval 6 applications in hydrocarbon exploration, production, and soil contamination studies. *Revue. Institut Français du Pétrole*, 53, 4, 421-437.
- Laignel B., (1997) Les altérites à silex de l'Ouest du Bassin de Paris: caractérisation lithologique, genèse et utilisation potentielle comme granulats. Doctorat en Sciences de la Terre. Université de Rouen Edition BRGM 219 p.
- Lappartient, J.R., (1985) Le "Continental terminal" et le Pléistocène ancien du bassin sénégal-mauritanien. Stratigraphie, sédimentologie, diagénèse, altérations, reconstitution des paléorivages au travers des cuirasses. Thèse es Sciences, Université Aix-Marseille III, 334 p.
- Latouche C., Maillet N. (1979) X ray mineralogy studies leg 48, Rockwall. Initial Reports of Deep Sea Drilling Project, vol. XLVIII, p. 665-676.
- Le Brusq J.Y., Loyer J.Y., Mougnot B., Carn M. (1987) Nouvelles Paragenèses à sulfates d'aluminium, de fer, et de Magnésium, et leur distribution dans les sols sulfatés acides du Sénégal *Science du Sol-3 - Vol. 25 - pp. 173-184.*
- Leduc C., Loireau M. (1997) Fluctuations piézométriques et évolution du couvert végétal en zone sahéenne (sud-ouest du Niger) *Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty (Proceedings of the Rabat Symposium SI)*. IAHS Publication N° 240, 193-200.
- Lerner. D.N (1997) Groundwater recharge. In: Saether OM, de Caritat P (eds) *Geochemical processes, weathering and groundwater recharge in catchments*. AA Balkema, Rotterdam, 109–150.

- Lerner. D.N., Issar. A.S., Simmers. I (1990) Groundwater recharge, a guide to understanding and estimating natural recharge. International Association of Hydrogeologists, Kenilworth, Rep 8, 345 p.
- Lerner, D.N., Mansell-Moulin, M., Dellow, D., Lloyd, J., (1982) Groundwater studies for Lima, Peru, In: Optimal allocation of water, IAHS Publication N°135, Exeter, United Kingdom, pp. 17-30.
- Lezine, A.M., (1987) Paléoenvironnements végétaux d'Afrique Nord-Tropicale depuis 12000 B.P. Analyse pollinique de séries sédimentaires continentales (Sénégal - Mauritanie). Thèse Sciences, Université Aix Marseille II, 2 volumes 180-207.
- Lezine, A.M., Saos, J.L., (1986) Paléohydrologie et paléo-environnement d'un lac sahélien à l'Holocène. INQUA/86, Dakar Symposium: Changements globaux en Afrique, 265-267.
- Leroux, M. (1980) Climat de l'Afrique Tropicale. (Tome I, II, III). Thèse d'Etat. Université de Dijon. 1427 p.
- Lepriol, J., Dieng, B. (1985) Synthèse hydrogéologique du Sénégal. Etude géologique structurale par photo-interprétation. Géométrie et limite des aquifères souterraines. Rapport D.E.H., Ministère Hydraulique Sénégal, 77 p.
- Leslie D., Welch K., Lyons W. B. (2014) Domestic Water Supply Dynamics Using Stable Isotopes $\delta^{18}\text{O}$, δD , and d-Excess. *J. Water Resource and Protection*, 6, 1517-1532.
- Lu L., Hongguang C., Xiao P., Jiantong W., Qianding C., Xuelian L. (2016) Identifying organic matter sources using isotopic ratios in a watershed impacted by intensive agricultural activities in Northeast China *Agriculture, Ecosystems and Environment* 222, 48–59.
- Liu, K.-K., Kao, S.-J., Wen, L.-S., Chen, K.-L., (2007) Carbon and nitrogen isotopic compositions of particulate organic matter and biogeochemical processes in the eutrophic Danshuei Estuary in northern Taiwan. *Science of Total Environment*, 382, 103–120.
- Lüniger, G., Schwark, L., (2002) Characterisation of sedimentary organic matter by bulk and molecular geochemical proxies: an example from Oligocene maar-type Lake Enspel, Germany. *Sedimentary Geology*, 148, 275–288.
- Madioune D.H., Faye S., Orban P., Brouyère S., Dassargues A., Mudry J., Stumpp C., Maloszewski P. (2014) Application of isotopic tracers as a tool for understanding hydrodynamic behavior of the highly exploited Diass aquifer system (Senegal) *Hydrology Journal*, 511, 443–459.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Madioune D. H., (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 Thèse de Doctorat, Université Liège et Université Cheikh Anta Diop Dakar, 311 p.
- Maine, M., Hammerly, J., Leguizamon, M.S., Pizarro, M., (1992) Influence of the pH and redox potential on phosphate activity in the Parana Medio system. *Hydrobiologia* 228, 83–90.
- Magnan, G., Garneau, M., Payette, S., (2014) Holocene development of maritime ombrotrophic peatlands of the St. Lawrence North Shore in eastern Canada. *Quaternary Research*, 82(1), 96-106.
- Maignien, R., (1965) Notice explicative. Carte pédologique du Sénégal au 1/1.000 000. ORSTOM. Centre Dakar-Hann. 63 p.
- Martin, A. (1970) Les nappes de la presqu'île du Cap Vert. Leur utilisation pour l'alimentation en eau de Dakar. Rapport B.R.G.M, 56 p.
- Martina, J.P., Hamilton, S.K., Turetsky, M.R., Phillippo, C.J., (2014) Organic matter stocks increase with degree of invasion in temperate inland wetlands. *Plant Soil* 385, 107–123.
- Marchand, C., Lallier-Vergès, E., Disnara, J.R., Kéravisa, D., (2008) Organic carbon sources and transformations in mangrove sediments: A Rock-Eval pyrolysis approach. *Organic Geochemistry*, 39, 408-421.
- Marchand, C., Baltzer, F., Lallier-Vergès, E., Albéric, P., (2004) Pore-water chemistry in mangrove sediments: relationship with species composition and developmental stages (French Guiana). *Marine Geology*, 208, 361-381.
- Marchand, C., Lallier-Vergès, E., Baltzer, F. (2003) The composition of sedimentary organic matter in relation to the dynamic features of a mangrove-fringed coast in French Guiana. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 56, 119–130.
- Mesić Kiš, I., Malvić T. (2014) Zonal estimation and interpolation as simultaneous approaches in the case of small input data set (Šandrovac field, Northern Croatia) *Rud-naft zbo*, 29, pp. 9-16
- Mesnage, V., Ogier, S., Bally, G., Disnar, J.-R., Lottier, N., Dedieu, K., Rabouille, C., Copard, Y. (2007). Nutrient dynamics at the sediment–water interface in a Mediterranean lagoon (Thau, France): influence of biodeposition by shellfish farming activities. *Marine Environmental Research*, 63, 257-277.
- Mesnage, V., Picot, B., (1995) The distribution of phosphate in sediments and its relation with eutrophication of a Mediterranean coastal lagoon. *Hydrobiologia* 297, 29–41.

- Mesnager, V., (1994) L'étude de la mobilité des formes de phosphate à l'interface eau-sédiment dans des écosystèmes lagunaires. Thèse de Doctorat. Université de Montpellier I, 252 p.
- Meyers, P. A., Tenzer G. E., Lebo, M. E., Reuter., J. E. (1998) Sedimentary record of sources and accumulation of organic matter in Pyramid Lake, Nevada, over the past 1000 years. *Limnology Oceanography* 43, 160–169.
- Meyers, P.A., (1994) Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. *Chemical Geology*, 114, 289–302.
- Meyers, P. A. (1990) Impacts of regional Late Quaternary climate changes on the deposition of sedimentary organic matter in Walker Lake Nevada. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 78, 229–240.
- Meysman F.J., Middelburg J.J., Heip C.H. (2006) Bioturbation: a fresh look at Darwin's last idea. *Trends in Ecology and Evolution* 21, 688–695.
- Michel, P. (1973) Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. Mémoire ORSTOM, n°63, 3 tomes, 743 p.
- Michel, P., (1956) Rapport préliminaire sur la géologie, la morphologie, l'hydrologie et la pédologie de la région des Niayes, de Cayar à l'embouchure du Sénégal. *Bull. M.A.S.*, N° 56, (2 fas.) Saint Louis. 38 p.
- Millot, G., (1964) Géologie des argiles. Edition Manson, Paris, 489 p.
- Mitra S., Wassmann R., Vlek P.L.G., (2005) An appraisal of global wetland area and its organic carbon stock. *Current Science* 88, 25–35.
- Merlivat L., Jouzel J. (1979) Global climatic interpretation of deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation. *Journal of Geophysical Research* 84, 5029-5123.
- Monjerezi, M., Vogt, D. R., Aagaard, P., Saka, D.K.J., (2011) Hydro-geochemical processes in an area with saline groundwater in lower Shire River valley, Malawi: An integrated application of hierarchical cluster and principal component analyses *Applied Geochemistry* 26, 1399-1413.
- Monciardini, C., (1965) Etude de 19 échantillons du permis Louga-Lac de Guiers. In Etude N°1, Laboratoire Micropaléontologie BRGM, Paris.
- Monciardini C. (1966) – La sédimentation éocène au Sénégal. Mémoire BRGM, Paris, 43, 1-65.
- Monteillet, J. (1986) Evolution quaternaire d'un écosystème fluvio-marin tropical de marge passive. Environnements sédimentaires et paléocéologie du delta et de la basse vallée du Sénégal depuis environ 100000 ans. Thèse es Sciences, Université de Perpignan, 264 p.

- Moers, M.E.C., Baas, M., De Leeuw, J.W., Boon, J.J., Schenck, P.A., (1990) Occurrence and origin of carbohydrates in peat samples from a red mangrove environment as reflected by abundances of neutral monosaccharides. *Geochimica and Cosmochimica Acta* 54, 2463–2472.
- Nagel, B., Gaye, B., Kodina, L.A., Lahajnar, N., (2009) Stable carbon and nitrogen isotopes as indicators for organic matter sources in the Kara Sea. *Marine Geology* 266, 42–51.
- National Wetlands Working Group (1997) *The Canadian Wetlands Classification System*. Wetlands Research Centre, University of Waterloo, Ed. by B.G. Warner and C.D.A. Rubec 76 p.
- Noël, H., Garbolino, E., Brauer, A., Lallier-Verges, E., De Beaulieu, J.L., Disnar, J.R., (2001) Human impact and soil erosion since ca. 5000 years attested by the study of the sedimentary organic content, “Lac d’Annecy, The French Alps”. *Journal of paleolimnology*, 25, 2, 229–244.
- Noël H (2001) *Caractérisation et calibration des flux organiques sédimentaires dérivant du bassin versant et de la production aquatique (Annecy, Le Petit Lac). Rôles respectifs de l’Homme et du Climat sur l’évolution des flux organiques au cours des 6000 dernières années. Thèse de Doctorat. Université d’Orléans. 273 p.*
- Noël Y, 1978 *Etude hydrogéologique des calcaires lutétiens entre Bambey et Louga (2^{ème} phase) Rapport BRGM 02, 82 p.*
- Nyenje, P.,M, Foppen, J.,W., Kulabako, R., Muwanga, A., Uhlenbrook S.,(2013) Nutrient pollution in shallow aquifers underlying pit latrines and domestic solid waste dumps in urban slums. *Environmental Management Journal*, 122, 15-24.
- Obiefuna, G. I., Orazulike, D. M., (2011) The Hydrochemical Characteristics and Evolution of Groundwater in Semiarid Yola Area, Northeast, Nigeria. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, 3(4): 400-416.
- Omari, H., Lammini, A., Dehbi A., Abdallaoui A. (2015): *Extractions Séquentielles du phosphore des sédiments Aquatiques: Cas des principaux Oueds de la région de Meknès - Département de Chimie, Université Moulay Ismail, Faculté des Sciences, Chimie Analytique et Environnement, Meknès, Maroc. International J. Innovation and Scientific Research ISSN 2351-8014 Vol. 13 N°1, pp. 72-82.*
- O.M.S., (1974) *Etude des ressources en eau du littoral nord entre Cayar et Saint-Louis. Rap., Projet O.M. S SEN,PIP.OI, 70 p.et annexes.*
- O.M.S., (1979) *Alimentation en eau de Dakar. Etude des réserves régulatrices du littoral nord. Rap., Projet Sénégal, P.N.U.D - O.M.S, SEN. 77.011,30 p. et annexes.*

- O'Leary M.H. (1988) Carbone Isotopes in photosynthesis. Fractionation technique may reveal new aspect of carbon dynamics in plants. *Biosciences* Vol. 38 N°5. 9 p.
- Orlowski N., Kraft P., Pferdmenges J., and Breuer L., (2016) Exploring water cycle dynamics by sampling multiple stable water isotope pools in a developed landscape in Germany. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, 3873–3894.
- Otero, X.L., Ferreira, T.O., Vidal-Torrado, P., Macias, F., (2006) Spatial variation in pore water geochemistry in a mangrove system (Pai Matos Island, Cananeia-Brazil). *Geochemistry* 21, 2171–2186.
- Payne, B. R., Quijano, L., Carlos L. D. (1979) Environmental isotopes in a study of the origin of salinity of groundwater in the Mexicali valley- Mexico. *J. Hydrology*, Vol. 41, Issue 3, 201-215.
- Pfahl S., Sodemann H. (2014) What controls deuterium excess in global precipitation? *Climate of the Past*, 10, 771-781.
- Pernel, F., Gageonnet, M., (1992) Réévaluation de la ressource en eau du littoral Nord. Synthèse des données, modélisation hydrodynamique et simulations prévisionnelles. Rapport BRGM35030. 54 p. + annexes.
- Pereira, H.G., Renca S., Sataiva J. (2003) A case study on geochemical anomaly identification through principal components analysis supplementary projection. *Applied Geochemistry* 18, 37–44.
- Pereira-Barreto S., (1962) Etude pédologique des "Niayes" méridionales (entre Kayar et Mboro). Rapport officiel de recherche scientifique et technique Outre-Mer, Dakar, 3 fascicules, 120 p.
- Petelas, C. P. and Diamantis, I. B. (1999). Origin and distribution of saline groundwater in the Upper Miocene aquifer system, coastal Rhodope area, northern Greece. *Hydrogeology Journal*, 7, 305–316.
- Peters, K. E., Sweeney, R. E., Kaplan, R. (1978). Correlation of carbon and nitrogen stable isotope ratios in sedimentary organic matter. *Limnology Oceanography* 23, 598-604.
- Pezeril, G., Chateauneuf, J.J. (1986) Caractères originaux des tourbes de la région des Niayes. BRGM et Direction des Mines. 6 - 89.
- Pimmel A., (1984) Contribution à l'étude sédimentologique des mangroves de Casamance (Sénégal): étude granulométrique et exoscopique. Thèse 3^{ème} cycle. Université Louis Pasteur de Strasbourg. 132 p. + annexes
- Pinson-Mouillot J., (1980) Les environnements sédimentaires actuels et quaternaires du plateau continental sénégalais (Nord de la presqu'île du Cap Vert, Sénégal. Thèse 3^{ème}

- cycle, Université de Bordeaux I, 106 p. + annexes.
- Piper, A.M., (1944) A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses Transactions, American Geophysical Union 25, 914 - 923.
- Plus, M., Deslous-Paoli, J.-M., Auby, I., Dagnault, F., (2001) Factors influencing primary production of seagrass beds (*Zostera noltii* Hornerm.) in the Thau Lagoon (French Mediterranean coast). *Journal of Experimental Marine Biological Ecology* 259, 63–84.
- Pulido Leboeuf, P. (2004) Seawater intrusion and associated processes in a small coastal complex aquifer (Castell de Ferro, Spain). *Applied Geochemistry* 19, 1517-1527.
- Puttalaz, J., (1962) Hydrogéologie de la région des Niayes. Rapport DAK 62-A12. 37 p.
- Qin, R., Wua, Y., Xu Z., Xie, D., Zhang C., (2012) Assessing the impact of natural and anthropogenic activities on groundwater quality in coastal alluvial aquifers of the lower Liaohe River Plain, NE China. *Applied Geochemistry* 31, 142–158.
- Ramsar (1971) Convention relative aux zones humides d'importance internationale particulièrement comme habitats des oiseaux d'eau signé 2-2-1971 amendée en 1982, 1987 et 1994. Office des Normes internationales et des Affaires juridiques Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO) 7 p.
- Ranjan, R.K., Routh, J., Ramanathan, A.L., (2011) Bulk organic matter characteristics in the Pichavaram mangrove-estuarine complex, south-eastern India. *Apply Geochemistry* 25, 1176–1186.
- Rapport Ressources minières du Sénégal (2010) Direction des Mines et de la Géologie 48 p.
- Raynal A., (1961) Flore et végétation des environs de Kayar (Sénégal) de la côte au lac Tanma. Diplôme d'Etudes Supérieures des Sciences, Dakar, 213 p.
- Reeve, A.S., Siegel, D.I., Glaser, P.H., (1996) Geochemical controls on peatland pore water from the Hudson bay lowland: a multivariate statistical approach. *Hydrology Journal*, 181 (1–4), 285–304.
- Ries F., Lange J., Schmidt S., Puhlmann H., Sauter M., (2015) Recharge estimation and soil moisture dynamics in a Mediterranean, semi-arid karst region *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 1439–1456.
- Rodier J., Bazin C., Broutin J.P., Chambon P., Chapsaup H, Rodi L., (1996) L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer. Dunod, Paris, 30-1086.
- Roger, J., Barusseau J.P., Castaigne. P., Duvail C., Noël. B. J., Nehlig. P., Serrano. O., Banton.O., Comte. J-C., Travi. Y., Sarr. R., Dabo. B., Diagne. E., Sagna. R (2009) Programme d'Appui au Secteur Minier cartographie géologique du bassin sédimentaire. Projet 9 ACP SE 009. 245 p.

- Rozanski K., Froehlich K., Mook W. G., (2001) Environmental isotopes in the hydrological cycle Principles and applications Volume III Surface water IHP-V 1 Technical Documents in Hydrology 1 N°39, Vol. 111 UNESCO, Paris, 2001. 117 p.
- Reddy K. R., DeLaune R., and Craft C. B. (2010) Nutrients in wetlands: Implications to water quality under changing climatic conditions. Final Report submitted to U. S. Environmental Protection Agency. EPA Contract N° EP-C-09-001. 52 p.
- Reddy K. R., DeLaune R. D. (2008) Biogeochemistry of Wetlands: Science and Applications. CRC Press, Taylor and Francis Group 800 p.
- Routh J, Choudhary P, Meyers PA, Kumar B (2009) Sedimentary record of nutrient loadings and recent trophic changes in Lake Norrviken, Sweden. *Journal of Paleolimnology* 42, 325-341.
- Ruffman A., Meagher L.J., Steward J.Mc.G. (1977) Bathymétrie de talus et du plateau continental du Sénégal et de la Gambie, Afrique de l'Ouest. Geomarine Associated Ltd New Scotia-Canada, Vol. 1, 130 p.
- Scanlon. B.R., Healy. R.W., Cook. P.G (2002) Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal* 10 (1), 18–39
- Scanlon. B. R., Keese. K. E., Flint. A. L., Flint. L. E., Gaye. C. B., Michael. W. E., Simmers. I., (2006) Global synthesis of groundwater recharge in semi-arid and arid regions *Hydrological processes*. 20, 3335–3370.
- Sakho, I., Mesnage V., Copard Y., Deloffre J., Faye G., Lafite R., Niang I. (2015) A cross-section analysis of sedimentary organic matter in a mangrove ecosystem under dry climate conditions: The Somone estuary, Senegal *J. African Earth Sciences* 101: 220–231.
- Sakho, I., (2011) Evolution et Fonctionnement Hydro-sédimentaire de la lagune de la Somone, Petite Côte, Sénégal Université de Rouen – Université Cheikh Anta Diop de Dakar 251 p.
- Sall, M., Diop, E.S., Cisse, 1., Diaw, A.J. (1978) Application de quelques méthodes de statistique descriptive à l'étude des sédiments des ensembles dunaires du Sénégal occidental. *Annales de la Faculté des Lettres Sciences Humaines, Dakar* N°8, 197-217.
- Sarr. R., Diouf M.B., Fall. M., Faye. A., Sow E (2008) Terminologie et Nomenclature stratigraphique du socle et du bassin sédimentaire sénégalais. Rapport Projet PASMI0 ACP SE 009 –Infrastructures géologiques: Cartographie, 51-97.
- Scholl M. A., Ingebritsen S. E., Janik C. J., Kauahikaua J. P. (1996) Use of precipitation and groundwater isotopes to interpret regional hydrology on a tropical volcanic island: Kilauea volcano area, Hawaii. *Water Resources Research*, Vol 32, N°12, 3525–3537.

- Sebag, D., (2002) Apports de la matière Organique pour la reconstitution des paléoenvironnements holocènes de la basse vallée de Seine. Fluctuations des conditions hydrologiques locales et environnements de dépôt. Thèse de Doctorat, Université de Rouen, 356 p.
- Singh, B., Singh, Y., Sekhon, G.S., (1995) Fertilizer-N use efficiency and nitrate pollution of groundwater in developing countries. *Journal of Contaminant Hydrology* 20, 167-184.
- Sollins, P., Spycher G., Glassman C. A. (1984) Net nitrogen mineralization from light and heavy fraction forest soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry* 16, 31–37.
- Song, Y., and Müller, G. (1999) Sediment–water interactions in anoxic freshwater sediments–mobility of heavy metals and nutrients. In: *Lecture Notes in Earth Sciences*, 81. (Ed.) Springer Verlag. 111 p.
- Spengler. A., Castelain. J., Cauvy. J., Leroy. M (1966) Le bassin secondaire-tertiaire du Sénégal. In: *Bassins sédimentaires du littoral africain. 1ère partie: Littoral Atlantique*, (Reyre, D. Ed.), Associations des Services Géologiques Africains (ASGA), pp 80-94.
- Stewart, R.E. and. Kantrud H.A (1971) Classification of Natural Ponds and Lakes in the Glaciated Prairie Region. Resource Publication 92. Bureau of Sport Fisheries and Wildlife, U.S. Fish and Wildlife Service, Washington, D.C. and Jamestown, North Dakota, United States of America. 64 p.
- Swanson, S.K., Bahr, J.M., Schwar, M.T., Potter, K.W., (2001) Two-way cluster analysis of geochemical data to constrain spring source waters. *Chem. Geol.*, 179, 73–91.
- Tandia, A.A. (1990) - Revue critique des méthodes d'évaluation de la recharge des nappes. Contribution de l'approche géochimique et isotopique. Louga-Nord Sénégal. Thèse 3^{ème} cycle. Université Cheikh Anta Diop - Dakar. 133 p. + annexes.
- Thatcher, L., Janzer, V.J., Edwards, R.W., (1977) Methods for determination of radioactive substances in water and fluvial sediments. In: *Techniques of Water Resources Investigations of the US Geological Survey*. US Government Printing Office, Washington, DC Books 5, (Chapter A5) pp. 79–81.
- Tellam, J. H. and Lloyd, J. W., (1986) Problems in the recognition of seawater intrusion by chemical means: an example of apparent equivalence. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology* 19, 389–398.
- Tessier, F., Flicoteaux, R., Lappartient, J.R., Nahon, D., Triat, J.M., (1975) -Réforme du concept de "Continental Terminal" dans les bassins côtiers de l'Ouest africain. 9^{ème} Congrès International de Sédimentologie Nice, Thème 1, 207-212.

- Tessier, F., (1952) Contribution à la stratigraphie et à la paléontologie de la partie Ouest du Sénégal (Crétacé et Tertiaire). Bulletin Direction des Mines Afrique Occidentale Française, Dakar, 14, 573 p.
- Tindall J.A., Petrusak R.L., McMahon P. B. (1995) Nitrate transport and transformation processus porous media. *Hydrology Journal* 169, 51-94.
- Thyne, G., Guler, C., Poeter, E., (2004) Sequential analysis of hydrochemical data for watershed characterization. *Ground Water* 42, 711–723.
- Travi, Y., Gac, J.Y, Fontes, J.C., Fritz, B. (1987): Reconnaissance chimique et isotopique des eaux de pluie au Sénégal. *Géodynamique*, 2, 43 – 53.
- Tricart J. (1965) Principes et méthodes de la géomorphologie. 496 p.
- Trochain, J., (1940) Contribution à l'étude de la végétation du Sénégal, Mémoire de l'Institut Français d'Afrique Noire, N°2, Paris, 433 p.
- Touré S. F et Fall A. S. (2001) Cités horticoles en sursis ? L'agriculture urbaine dans les grandes Niayes au Sénégal, Ottawa, Centre de recherches pour le développement international, 2001, 120 p.
- Twilley, R.R., Chen, R.H., Hargis, T., (1992) Carbon sinks in mangrove forests and their implications to the carbon budget of tropical coastal ecosystems. *Water Air Soil Pollution* 64, 265–288.
- USAID (1986) Cartographie et télédétection des ressources de la République du Sénégal. Etude de la géologie, de l'hydrologie, des sols, de la végétation et des potentiels d'utilisation des sols. SDSU-RSI-86-01 Direction de l'Aménagement du Territoire- Agency for International Development - Remote Sensing Institute. 653 p.+ annexes.
- Vengosh, A. and Pankratov I., (1998). Chloride/bromide and chloride fluoride ratios of domestic sewage effluents and associated contaminated ground water. *Ground Water*, 36, 815-824.
- Vitousek P.M., Mooney H.A., Lubchenco J., Melillo J. (1997) Human domination of Earth's ecosystems. *Science* 277, 494–499.
- Vitt, D.H., Halsey L.A., Thormann M.N., and Martin T., (1996) Peatland Inventory of Alberta: Overview of Peatland Resources in the Natural Regions and Subregions of Alberta. Alberta Peat Task Force. Edmonton, Alberta. Publication 96-1.
- Wang, Y., Liu, J.-S., Wang, J.-D., Sun, C.-Y., (2012) Effects of wetland reclamation on soil nutrient losses and reserves in Sanjiang Plain, Northeast China. *J. Integr. Agric.* 11, 512–520.

- Wang, G. P., Liu, J. S., Wang, J. D., Yu, J. B., (2006) Soil phosphorus forms and their variations in depressional and riparian freshwater wetlands (Sanjiang Plain, Northeast China). *Geoderma* 132, 59–74.
- Ward, J.H., (1963) Hierarchical grouping to optimize an objective function. *J. Am. Stat. Assoc.* 58, 236–244.
- West, A.G., February, E.C., Bowen G.J. (2014) Spatial analysis of hydrogen and oxygen stable isotopes (“isoscapes”) in groundwater and tap water across South Africa. *Journal of Geochemical Exploration*, 145, pp. 213-222.
- Whittemore, D.O., (1988) Bromide as a tracer in ground-water studies: Geochemistry and analytical determination: Proceedings Ground Water Geochemistry Conference, National Water Well Association, Dublin, OH, p. 339-360.
- World Health Organization (WHO) (2011) Guidelines for Drinking Water Quality.
- Yang W., Cheng H., Hao F., Ouyang W., Liu S., Lin C. (2012) The influence of land-use change on the forms of phosphorus in soil profiles from the Sanjiang Plain of China. *Geoderma* 189–190, 207–214.
- Wilson & Company (2015) Wetland Delineation Report. For the C-470 Corridor Revised Environmental Assessment 120 p.
- Yidana, S.,M., Banoeng-Yakubo, B., Akabzaa, T., M. (2010) Analysis of groundwater quality using multivariate and spatial analyses in the Keta basin, Ghana. *Journal of African Earth Sciences* 58, 220–234.
- Xiao, H.-Y., Liu, C.-Q., (2010) Identifying organic matter provenance in sediments using isotopic ratios in an urban river. *Geochemical Journal* 44, 181–187.
- Xue, D.M., Botte, J., Baets, B.D., Accoe, F., Nestler, A., Taylor, P., Cleemput, O.V., Berglund, M., Boeckx, P., (2009) Present limitation and future prospects of stable isotope methods for nitrate source identification in surface- and groundwater. *Water Research* 43, 1159–1170.
- Zghibi A, Tarhouni J, Zouhri L., (2013) Assessment of seawater intrusion and nitrate contamination on the groundwater quality in the Korba coastal plain of Cap-Bon (North-east of Tunisia). *Journal of African Earth Sciences* 87, 1–12.
- Zedler, J.B., (2003) Wetlands at your service: reducing impacts of agriculture at the watershed scale. *Frontiers in Ecology and the Environment* 1, 65–72.
- Zimmermann, U., Ehhalt, D. and Munnich, K.O., (1967) Soil water movement and evapotranspiration: changes in the isotopic composition of water. Proceedings of Symposium IAEA, Vienna, 567-585.

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Localisation de la zone d'étude	5
Figure 2 : Dynamique de la population dans les régions Thiès, Louga et Saint-Louis de la zone des Niayes de 1976 à 2015	6
Figure 3 : Indice pluviométrique standardisé de 1930-2013 au niveau des stations climatiques de Thiès, Louga et Saint-Louis ainsi que leur moyenne mobile sur 5 ans en pointillé noir	9
Figure 4 : Moyenne de pluviométrie mensuelle de 1930-2013 pour les stations pluviométriques de Thiès, Louga et Saint-Louis	10
Figure 5 : Ellipse de Bois des séries pluviométriques avant et après la grande sécheresse de 1970 au niveau des stations climatiques Thiès (A-A'), Louga (B-B') et Saint-Louis (C-C')	11
Figure 6 : Températures moyennes mensuelles de la période de 1977 à 2013 des stations de Thiès, Louga et Saint-Louis	13
Figure 7 : Humidités moyennes mensuelles de la période de 1977 à 2013 des stations de Thiès, Louga et Saint-Louis	14
Figure 8 : Vitesse des vents mensuels moyennes de la période de 1977 à 2013 des stations de Thiès, Louga et Saint-Louis	15
Figure 9 : Insolations moyennes mensuelles pour les stations de Thiès, Louga et Saint-Louis de 1977 à 2013	16
Figure 10 : Evaporation moyenne mensuelle de la période de 2000 à 2013 pour les stations de Thiès et Saint-Louis	17
Figure 11 : Evapotranspiration potentielle (ETP) annuelle et pluviométrie de la période de 1981 à 2013 pour les stations de Thiès, Louga et Saint-Louis	19
Figure 12 : Coupe structurale de la région des Niayes modifiée (BRGM, 1984)	21
Figure 13 : Carte bathymétrique modifiée (Ruffman et al., 1977)	23
Figure 14 : Typologie des sols modifiée (USAID, 1986)	27
Figure 15 : Représentation schématique d'une Niaye et de sa végétation (Pezeril, 1983) modifié	31
Figure 16 : Géologie du bassin Sénégal-mauritanien modifiée (Bellion, 1987)	33
Figure 17 : Coupe Schématique du bassin sédimentaire sénégal-mauritanien au parallèle de Dakar modifiée (Spengler et al., 1966)	34

Figure 18 : Géologie du Littoral Nord (Geoter, 2009).....	37
Figure 19 : Aquifères du Sénégal (Travi, 1988) modifiée	43
Figure 20 : Aquifères du secteur Littoral Nord	47
Figure 21 : Coupe hydrogéologique SSW-NNE et E-W du secteur Littoral Nord modifié (Pernel et Gageonnet 1992)	48
Figure 22 : Cartes piézométriques de la zone du Littoral Nord	51
Figure 23 : Cartographie des transmissivités et de la perméabilité (source BRGM, 1992).....	52
Figure 24 : Dynamique de l’exploitation dans la zone du Littoral de 1999 à 2011	53
Figure 25 : Localisation des stations d’échantillonnage des eaux de pluies et de la nappe du Littoral Nord ainsi les sédiments et les eaux des zones humides de Mboro, Lompoul et Potou	61
Figure 26 : Schéma et illustration des mesures et échantillonnage des sols	62
Figure 27 : Schéma d’extraction des eaux interstitielles in-situ par bougie poreuse	64
Figure 28 : Diffractogramme de l’échantillon 25-50 cm de Mboro centre	72
Figure 29 : Extraction des formes de phosphates (Golterman et Booman, 1988), modifiée ...	73
Figure 30 : Principe du Rock-Eval (RE6) et calcul des paramètres (Lafargue et al., 1998 modifié Sakho, 2011).....	75
Figure 31 : Transect N-S (T1) et W-E (T2, T3 et T4) reportés sur un Modèle Numérique de Terrain du Littoral Nord	87
Figure 32 : Transect Nord–Sud de l’évolution de la piézométrie de la nappe du Littoral Nord 1976 à 2012 (T1)	88
Figure 33 : Transects Est-Ouest (T2, T3, T4) de la piézométrie de la nappe du Littoral Nord de 1976 à 2012.....	89
Figure 34 : Variabilité des cumuls de déficit pluviométriques et de la piézométrie moyenne annuelle de 1977 à 2013 dans les secteurs Nord (A), centre (B) et Sud (C)	92
Figure 35 : Hauteurs pluviométriques au niveau des neuf stations suivis en 2011	96
Figure 36 : Aire d’alimentation des pluies (polygone de Thiessen en 2011) – Pluviométrie du Sénégal (Isohyètes).....	97
Figure 37 : Bilan Hydrologique mensuel par la méthode de Thornwaite dans les zones Nord (A) et Centre (B) du Littoral Nord au Sénégal	105
Figure 38 : Bilan Hydrologique mensuel par la méthode de Thornwaite dans la zone Sud (respectivement Ouest, Centre et Est) du Littoral Nord au Sénégal.....	106
Figure 39 : Distribution spatiale du pH au cours des quatre campagnes	113
Figure 40 : Répartition Spatiale du TDS au cours des quatre campagnes	115

Figure 41 : Carte d'occupation du sol	117
Figure 42 : Composition chimique des eaux souterraines par Boxplots	119
Figure 43 : Concentration chimique moyenne annuelle en Mn, Fe et Al de la nappe du Littoral Nord	121
Figure 44 : Distribution spatiales des éléments mineurs (Fe, Mn et Al) en juin 2011 (A) et Février 2012 (B).....	122
Figure 45 : Diagramme Na vs Cl (A) et Na/Cl vs Cl (B).....	126
Figure 46 : Diagramme Br vsCl (A) et Br/Cl vs Cl (B)	127
Figure 47 : Variabilité du D-excess au niveau des stations pluviométriques de Mboro, Kébémér et Potou	141
Figure 48 : Variabilité saisonnière du D-Excess dans la nappe du littoral Nord (A-A') et Diagramme binaire Cl_δ ¹⁸ O (B-B') en saison sèche (C3) et en saison humide (C4)	143
Figure 49 : Diagramme binaire Profondeur de l'eau vs δ ¹⁸ O en saison sèche (C3) et en saison humide (C4)	144
Figure 50 : Distribution ¹⁸ O vs Tritium dans les pluies et la nappe en saison humide (2012)	145
Figure 51 : Coupe schématique d'une Niaye et des stations d'échantillonnage	154
Figure 52 : Distribution granulométrique en fonction de la profondeur dans les centres et sur les versants des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou (juin 2011).....	156
Figure 53 : Diagramme ternaire de la distribution granulométrique des sédiments dans les stations du versant (V) et du centre (N) des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou (juin 2011)	157
Figure 54 : Distribution de la semi-quantification de la minéralogie des argiles au niveau de la zone humide de Mboro au niveau du centre (N) et du versant (V)	160
Figure 55 : Variabilité de la teneur en eau dans les profils de ZNS au cours des saisons sèches de Juin 2011 (A-A') et Février 2012 (B-B') dans le centre (N) et versant (V) des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou.....	162
Figure 56 : Variabilité de la teneur en eau dans les profils de ZNS en saison humide d'Octobre 2012 au sein des Niayes de Mboro et Lompoul sur trois points d'échantillonnage distants de 1 m	163
Figure 57 : Variation du Potentiel d'oxydo-réduction (A-A'), du pH (B-B') et de la température (C-C') dans les profils de ZNS au niveau du centre (N) et versants (V) des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou	165

Figure 58 : Variation du Carbone Organique Particulaire (COP) en fonction de la profondeur dans les Centres (N) et sur les Versants (V) des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou (juin 2011)	168
Figure 59 : Diagramme de Van-Krevelen dans les stations centres (N) et versants (V) des Niayes de Mboro (MB), Lompoul (LO) et Potou (PO) (juin 2011)	171
Figure 60 : Diagramme binaire IH Vs TpeakS2 centres (N) et versants (V) des Niayes de Mboro (MB), Lompoul (LO) et Potou (PO) (juin 2011)	172
Figure 61 : Diagramme binaire COP Vs IH dans le centre des Niayes (N) et sur les Versants (V) (juin 2011)	175
Figure 62 : Variation de la chimie des eaux interstitielles en fonction de la profondeur dans le centre (N) et versant (V) des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou (juin 2011) ...	181
Figure 63 : Variation de la chimie des eaux interstitielles en fonction de la profondeur dans le centre (N) et versant (V) des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou (Février 2012)	182
Figure 64 : Chimie des eaux interstitielles au niveau de trois profils dans le centre des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou (Octobre 2012)	183
Figure 65 : Variation du Carbone Organique Dissous en fonction de la profondeur dans les stations centres (MBN, LON et PON) et versant (MBV, LOV et POV) des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou (juin 2011)	187
Figure 66 : Variabilité du Carbone Organique Dissous (COD) au niveau de trois profils dans le centre des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou (Octobre 2012)	189
Figure 67 : Distribution des teneurs en PO ₄ au niveau de trois profils dans le centre des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou (saison humide Octobre 2012)	191
Figure 68 : Distribution des teneurs en NH ₄ au niveau de trois profils dans le centre des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou (saison humide Octobre 2012)	192
Figure 69 : Variabilité de la salinité en fonction des saisons dans les Niayes de Mboro (MB), Lompoul (LO) et Potou (PO) en saison sèche (SS), période de transition (ST) et humide (SH).....	198
Figure 70 : Composition isotopique des eaux de pluie du Littoral Nord en 2011 et 2012 (Mboro, Kebemer et Potou) et ceux de Travi, 1987	199
Figure 71 : Variation des valeurs de ¹⁸ O à Mboro, Lompoul et Potou des EI provenant interstitielles extraites par centrifugation en saison sèche	201
Figure 72 : Variabilité des valeurs de ¹⁸ O dans les Niayes de Mboro, Lompoul et Potou provenant des bougies Poreuses en saison sèche (A) et post-pluviale (B)	202

Figure 73 : Composition isotopique des eaux interstitielles en saison sèche (A) et humide (B) de 2012 (DML: Droite Météorologique Locale, DMM: Droite Météorologique Mondiale, DEI: Droite des Eaux interstitielles)	205
Figure 74 : Composition isotopique des eaux interstitielles en saison post-pluviale de 2013 dans la ZNS des trois Niayes de Mboro-Lompoul-Potou (A) et sur un transect Versant-Centre-Bas fond de la Niaye de Mboro (B)	206
Figure 75 : Localisation de la Niaye de Mboro et des trois stations d'échantillonnage versant – centre – bas-fond de la Niaye de Mboro.....	210
Figure 76 : (A) Diagramme ternaire de la granulométrie des sédiments dans la Niaye de Mboro sur un transect Versant (MB1) - Centre (MB2) – Bas-Fond (MB3) (Octobre 2013) (B) : Observation des échantillons de Mboro au Microscopie à balayage notifiant la présence de Pyrite (FeS)	212
Figure 77 : Caractérisation sédimentologique et physico-chimique de versant de la Niaye de Mboro	214
Figure 78 : Caractérisation sédimentologique et physico-chimique de la zone centre de la Niaye de Mboro	215
Figure 79 : Caractérisation sédimentologique et physico-chimique de la zone Bas-fond de la Niaye de Mboro	216
Figure 80 : Variabilité de la teneur en eau en fonction de la profondeur dans la Niaye de Mboro sur un transect Versant (MB1) - Centre (MB2) – Bas-fond (MB3) (Octobre 2013).....	218
Figure 81 : Variabilité du Carbone Organique Particulaire (COP) dans la zone non saturée des stations MB1, MB2 et MB3 en fin saison humide (Octobre 2013).....	219
Figure 82 : Variabilité des paramètres qualitatifs de la matière organique en fonction de la profondeur IH (A), IO (B) et TpeakS2 (C).....	221
Figure 83 : Chimie des eaux interstitielles dans la Niaye de Mboro sur un transect Versant (MB1) - Centre (MB2) – Bas-Fond (MB3) en fin saison humide (Octobre 2013)	224
Figure 84 : Distribution du PO ₄ total (A) et Fer total (B) dans la Niaye de Mboro sur un transect Versant (MB1) - Centre (MB2) – Bas-Fond (MB3) en fin de saison humide (Octobre 2013).....	227
Figure 85 : Les formes de phosphore en (µg P/g) en fonction de la profondeur dans la Niaye de Mboro sur un transect Versant (MB1) - Centre (MB2) – Bas-Fond (MB3) en fin saison humide (Octobre 2013)	229

Figure 86 : Diagramme ternaire des formes de phosphore particulaire dans la Niaye de Mboro sur un transect Versant (MB1) - Centre (MB2) – Bas-Fond (MB3) (Octobre 2013)	230
Figure 87 : Composition isotopique en fonction de la profondeur dans la Niaye de Mboro sur un transect Versant (MB1) - Centre (MB2) – Bas-Fond (MB3) (Octobre 2013) et la droite de pondération isotopique des eaux de pluie (en pointillé)	232
Figure 88 : Variation $\delta^{13}\text{C}$ (A) et $\delta^{15}\text{N}$ (B) en fonction de la profondeur dans la Niaye de Mboro sur un transect Versant (MB1) - Centre (MB2) – Bas-Fond (MB3) (Octobre 2013)	234
Figure 89 : Sources du carbone et azote issues des valeurs de $\delta^{13}\text{C}$ vs $\delta^{15}\text{N}$ et	236
Figure 90 : Processus biogéochimiques et Origine du carbone et de l'azote	237
Figure 91 : Ratio C/N dans la Niaye de Mboro en fonction de la profondeur dans la Niaye de Mboro sur un transect Versant (MB1) - Centre (MB2) – Bas-Fond (MB3) (Octobre 2013)	239
Figure 92 : Valeurs $\delta^{13}\text{C}$ vs C/N des principaux types de plantes source de matière organique (Meyers et al., 1999) modifiée	240
Figure 93 : Diagramme de Van-Krevelen de la MO sédimentaire	248
Figure 94 : Distribution des formes de phosphore particulaire dans différentes zones humides	251
Figure 95 : Relation $\text{PO}_4\text{-MO}$ vs Perte au Feu	251
Figure 96 : Séquence des principales réactions Redox produisant du carbone organique dissous à pH neutre des eaux souterraines en accord avec le potentiel d'oxydo-réduction (Clark et Fitz, 1999 modifiée)	254

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Segmentation de Hubert des séries pluviométriques au niveaux des stations climatiques de Thiès, Louga et Saint-Louis.....	12
Tableau 2 : Synthèse Géochronologique du Quaternaire	41
Tableau 3 : Synthèse de la stratégie d'étude (SS : saison sèche, SP : saison pluie, SPP saison post-pluviale)	57
Tableau 4 : Résumé du nombre d'échantillons obtenus par profil de ZNS par la méthode de Tarière.....	63
Tableau 5 : Classification granulométrique selon Wentworth, modifiée 1982	70
Tableau 6 : Paramètres hydrologiques de la piézométrie de 1960 à 2012	95
Tableau 7 : Bilan des Chlorures et Calcul de la Recharge dans zones Centre (C) et Versants (V) des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou en 2011 (A) et 2012 (B).....	100
Tableau 8 : Synthèse et pourcentage de recharge par rapport aux pluies dans les zones Centre (C) et Versant (V) des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou en 2011 (A) et 2012 (B) ..	101
Tableau 9 : Bilan Hydrique du compartiment Sud du Littoral Nord de la période 1981-2013 par la méthode de Thorthwaite	103
Tableau 10 : Infiltration en fonction de types de sols du Littoral Nord	107
Tableau 11 : Composition chimique des eaux de pluie (en mg/l) des stations pluviométriques du Littoral Nord en 2011	110
Tableau 12 : Statistique descriptive des paramètres physico-chimiques et des ions mineurs au cours des campagnes en saison sèche (1 et 2) , en mi-saison sèche (3) et en saison humide (4).....	112
Tableau 13 : Valeurs calculées de la fraction saline (Fs), des concentrations de mélange (Mi,mix) et du delta ionique du bromure (ΔBr) dans les eaux souterraines du Littoral Nord au cours des quatre campagnes 1, 2, 3 et 4.....	129
Tableau 14 : Caractéristiques des eaux de la nappe des Niayes de Mboro, Lompoul et Potou en fin saison sèche (1), mi-saison sèche (2) et en saison humide (3)	197
Tableau 15 : Statistique descriptive de la chimie des eaux interstitielles au niveau des stations versant- centre-bas-fond de la Niaye de Mboro.....	223
Tableau 16 : Valeurs des flux de diffusion des nutriments PO_4^{3+} et NH_4^- dans la Niaye de Mboro sur un transect Versant (MB1) - Centre (MB2) – Bas-Fond (MB3) (Octobre 2013).....	226
Tableau 17 : Synthèse des données isotopiques sur les sédiments de Mboro	233

LISTE DES ANNEXES

Annexe I : PARAMETRES CLIMATIQUES	XXVI
Annexe II : DONNEES STATISTIQUES	XXVIII
Annexe III : Indice de saturation des eaux	XXX
Annexe IV : Bilan Hydrologique	XXXI
Annexe V : Article Scientifique « Spatial and seasonal variability of groundwater hydrochemistry in the Senegal North Littoral aquifer using multivariate approach » (Kaba et <i>al.</i> , 2016)	XXXVI
Annexe VI : Sédimentologie et Minéralogie.....	XXXVII
Annexe VII : Minéraux Argileux	XLIII
Annexe VIII : Chimie des eaux interstitielles	XLIV
Annexe IX : Carbone Organique Dissous dans les eaux de subsurfaces et les eaux interstitielles issus des bougies poreuses en Octobre 2013	L
Annexe X : Distribution des ions Ca, Mg, Br, K et du COD dans les stations versant (MB1), centre (MB2) et bas-fond (MB3) en Octobre 2013	LI
Annexe XI : Variation temporelle du Tritium en fonction dans les pluies de Mboro , Kebemer et Potou.....	LII
Annexe XII : Distribution du Phosphore Organique (PO) et du Phosphore Inorganique (PI) dans les stations versant (MB1), centre (MB2) et bas-fond (MB3) de la Niaye Mboro	LIII

LISTE DES FIGURES DES ANNEXES

FIGURE I-1: Variabilité de l’ETP et de la pluie dans les stations de Thiès, Louga et Saint-Louis (2003-2013).....	XXVII
FIGURE VI-2: Courbes granulométriques et allures modales du profil de Zone Non Saturée de la station centre de Mboro par tranche de sol de 25 cm de Mboro de 0 à 125 cm de profondeur	XXXIX
FIGURE VI-3 : Courbes granulométriques et allures modales du profil Zone Non Saturée de la station versant Mboro par tranche de sol de 25 cm de 0 à 200 cm de profondeur	XL
FIGURE VI-4 : Courbes granulométriques et allures modales du profil Zone Non Saturée de la station centre de Lompoul par tranche de sol de 25 cm de 0 à 100 cm de profondeur	XLI
FIGURE VI-5 : Courbes granulométriques et allures modales du profil Zone Non saturée de Profil Potou Versant (2) par tranche de sol de 25 cm de 175 à 450 cm de profondeur	XLII
FIGURE VIII-6 : Distribution des ions Na, Ca, K, Mg, NH ₄ le long de la ZNS dans les eaux interstitielles dans les stations centres des Niayes Mboro, Lompoul et Potou en Juin 2011	XLIV
FIGURE VIII-7 : Distribution des ions Na, Ca, K, Mg, NH ₄ le long de la ZNS dans les eaux interstitielles dans les stations versants des Niayes Mboro, Lompoul et Potou en Juin 2011	XLV
FIGURE VIII-8 : Distribution des ions K, NH ₄ et Mg le long de la ZNS dans les eaux interstitielles dans les stations centres et Versant des Niayes Mboro, Lompoul et Potou en Février 2012	XLVI
FIGURE VIII-9 : Distribution des ions Na et Ca le long de la ZNS de trois profils dans les eaux interstitielles dans les stations centres des Niayes Mboro, Lompoul et Potou en Octobre 2012	XLVII
FIGURE VIII-10 : Distribution des ions Mg et Br le long de la ZNS de trois profils dans les eaux interstitielles dans les stations centres des Niayes Mboro, Lompoul et Potou en Octobre 2012	XLVIII
FIGURE VIII-11 : Distribution des ions K le long de la ZNS de trois profils dans les eaux interstitielles dans les stations centres des Niayes Mboro, Lompoul et Potou en Octobre 2012	XLIX

LISTE DES TABLEAUX DES ANNEXES

TABLEAU I-1 : Evapotranspiration moyenne mensuelle potentielle (mm) pour la période 1981-2012 par la méthode de Turc.....	XXVI
TABLEAU 2 : Evapotranspiration annuelle de 2003 à 2013 par la méthode de Turc.....	XXVI
TABLEAU II-3 : Matrice de corrélation issue de l'Analyse en Composantes Principales des données hydrochimiques des eaux souterraines du Littoral Nord en 2010 et 2011	XXVIII
TABLEAU II-4 : Matrice de corrélation issue de l'Analyse en Composantes Principales des données hydrochimiques des eaux souterraines du Littoral Nord en Février et Octobre 2012	XXIX
TABLEAU II-5 : Indice de saturation moyen des familles chimiques des eaux souterraines en fonction des saisons NB: Campagne 1 Juillet 2010 (Familles C1_1 à C4_1), Campagne 2 Juin 2011 (Famille C1_2 à C4_2), Campagne 3 Février 2012 (Famille C1_3 à C4_3) et Campagne 4 Octobre 2012 (C1_4 à C4_4).....	XXX
TABLEAU IV-6 : Bilan Hydrologique dans le secteur de Louga par la méthode de Thornwaite.....	XXXII
TABLEAU IV-7 : Bilan Hydrologique dans le secteur de Saint-Louis par la méthode de Thornwaite.....	XXXIII
TABLEAU VI-8 : Calcul des Indices granulométriques dans le centre des dépressions par tranche de sol de 25 cm de Mboro (MB) de 0 à 25 cm, Lompoul (LO) de 0 à 100 cm et Potou (PO) de 0 à 75 cm de profondeur	XXXVII
TABLEAU VII-9 : Cortège des minéraux argileux dans les Niayes de Mboro, Lompoul et Potou.....	XLIII



TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION.....	1
PARTIE I : CONTEXTE DE L'ETUDE DU LITTORAL NORD AU SENEGAL	
CHAPITRE I : CADRE PHYSIQUE ET CONTEXTE CLIMATIQUE	5
I.1. Localisation Géographique	5
I.2. Contexte climatique	7
1.2.1. Climat	7
1.2.2. Pluviométrie	8
1.2.3. Températures	12
1.2.4. Humidité relative.....	13
1.2.5. Vents.....	14
1.2.6. Insolation	16
1.2.7. Evaporation et Evapotranspiration	17
CHAPITRE II : GEOMORPHOLOGIE ET HYDROGRAPHIE	20
II.1. Système dunaire	20
II.1.1. Morphologie des formations dunaires	20
II.1.2. Morphologie du plateau continental nord	21
II.2. Zones humides dépressionnaires : Les Niayes.....	24
II.3. Hydrographie	24
II.4. Sols.....	25
II.4.1. Sols ferrugineux tropicaux	25
II.4.2. Sols minéraux peu évolués	25
II.4.3. Sols hydromorphes	25
II.5. Végétation	28
II.5.1. Végétation de système dunaire.....	28
II.5.2. Végétation des Niayes	29
CHAPITRE III : CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE.....	32
III.1. Contexte régional du bassin sénégalo-mauritanien / histoire dynamique et principales périodes	32
III.2. Géologie locale du secteur du Littoral Nord.....	35
III.2.1. Lithostratigraphie	35
III.2.1.1. Formations Eocènes	35
III.2.2. Formations quaternaires	38
III.2.1.2.1. Continental terminal	38
III.2.1.2.2. Quaternaire	38

III.2.3. Tectonique	42
III.3. Contexte Hydrogéologique	42
III.3.1. Contexte hydrogéologique à l'échelle du bassin du Sénégal	42
III.3.2. Hydrogéologie du secteur d'étude.....	45
III.3.2.1. Synthèse des connaissances/historique des recherches.....	45
III.3.2.2. Géométrie et structure du système aquifère	45
III.3.2.3. Caractéristiques hydrauliques	49
III.3.2.4. Caractéristiques hydrochimiques	54
PARTIE II : MATERIELS ET METHODES	
CHAPITRE IV : DONNEES EXISTANTES ET COLLECTE DE DONNEES COMPLEMENTAIRES	55
IV.1. Acquisition des données existantes.....	55
IV.2. Stratégie de collectes de données complémentaires	55
IV.2.1. Echelle régionale	58
IV.2.2. Echelle locale des sites pilotes	58
IV.3. Mesures in situ et Méthodes d'échantillonnage.....	58
IV.3.1. Nappe	58
IV.3.2. Eaux de pluie	59
IV.3.3. Zone non saturée	59
IV.3.3.1. Profils de Zone Non Saturée et de sols	62
IV.3.3.2. Extraction des eaux interstitielles in-situ (Centrifugation, Lixiviation, Bougies Poreuses).....	63
CHAPITRE V : TECHNIQUES ANALYTIQUES	65
V.1. Teneur en eau et Porosité.....	65
V.1.1. Détermination de la teneur en eau	65
V.1.2. Méthodes de calcul de la porosité	65
V.1.3. Extraction des eaux interstitielles.....	65
V.2. Analyses chimiques des eaux.....	66
V.3. Analyses Isotopiques	66
V.3.1. Préparation des échantillons.....	66
V.3.1.1. Eaux	66
V.3.1.2. Sols.....	67
V.3.2. Techniques analytiques	67
V.3.2.1. Isotopie des eaux ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, T)	67
V.3.2.2. Isotopie des sols ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$).....	68

V.4. Analyses sédimentologiques et géochimiques.....	69
V.4.1. Analyses granulométriques	69
V.4.2. Diffractomètre X	70
V.4.2.1. Préparation et fabrication des lames minces	70
V.4.2.2. Analyse par diffractomètre RX	71
V.4.2.3. Cortège des minéraux argileux	71
V.4.2.4. Semi-quantification des cortèges des minéraux argileux.....	72
V.4.3. Fractionnement du Phosphore	72
V.4.4. Analyse de la Matière Organique.....	73
V.4.4.1. Perte au Feu.....	73
V.4.4.2. Pyrolyse Rock- Eval	74
V.4.4.2.1. Traitement préalable des sédiments.....	74
V.4.4.2.2. La phase de pyrolyse	74
V.4.4.2.3. La phase d'oxydation	74
CHAPITRE VI : METHODES DE TRAITEMENT DES DONNEES	76
VI.1. Traitements statistiques.....	76
VI.2. Traitements graphiques et cartographiques.....	77
VI.3. Estimation de la recharge de la nappe.....	77
VI.4. Bilan Hydrique	79
VI.5. Bilan de Masse par les ions bromures.....	82
PARTIE III : EVALUATION QUANTITATIVE ET QUALITATIVE DE LA NAPPE DU LITTORAL NORD	
CHAPITRE VII : EVALUATION QUANTITATIVE DES EAUX SOUTERRAINES.....	86
VII.1. Variation temporelle et spatiale des fluctuations de la nappe	86
VII.2. Impact de la pluviométrie sur la dynamique de la nappe	91
VII.3. Les eaux de pluies du Littoral Nord	96
VII.4. Recharge de la nappe.....	98
VII.5. Estimation du bilan hydrique	102
CONCLUSION CHAPITRE VII.....	108
CHAPITRE VIII : EVALUATION QUALITATIVE DES EAUX DU LITTORAL NORD.....	109
VIII.1. Hydrochimie des eaux de pluie	109
VIII.2. Caractérisation physico-chimique (CE, pH, TDS, T, Eh, O ₂) de la nappe.....	111
VIII.3. Hydrochimie des ions majeurs et mineurs de la nappe – statistiques descriptives	118

VIII.3.1. Ions majeurs	118
VIII.3.2. Eléments mineurs (Fe, Mn, Al).....	120
VIII.4. Estimation et processus de salinisation de la nappe	123
CONCLUSION DU CHAPITRE VIII	131
CHAPITRE IX : ORIGINE DE LA MINERALISATION ET PROCESSUS GEOCHIMIQUES DANS LA NAPPE DU LITTORAL NORD.....	133
IX.1. Etude la variabilité spatiale et saisonnière de l’hydrochimie de la nappe du Littoral Nord par Approche Géostatistique.....	133
IX.1.1. Variabilité saisonnière de la qualité des eaux souterraines	133
IX.1.2. Classification des familles chimiques et Minéralisation de la nappe: Approche statistique multivariée	134
IX.1.2.1. Détermination des familles chimiques par CH	134
IX.1.2.2. Evaluation des processus géochimiques par Analyse ACP	136
IX.1.3. Sources de pollution et processus de minéralisation	137
IX.1.4. Isotopes environnementaux	138
IX.1.4.1. Composition isotopique de l'eau de pluie	138
IX.1.4.2. Composition isotopique des eaux souterraines	139
IX.2. Processus géochimiques et Age des eaux: Approche D-Excess	140
IX.2.1. Eaux de pluie	140
IX.2.2. Nappe	141
IX.2.3. Détermination des sources et processus de transfert	146
PARTIE IV : FONCTIONNEMENT HYDRO-GEOCHIMIQUE ET SEDIMENTAIRE DE L’ECOSYSTEME DES NIAYES SUR LE LITTORAL NORD	
CHAPITRE X : ETUDE GRANULOMETRIQUE, MINERALOGIQUE ET GEOCHIMIQUE DES SEDIMENTS	155
X.1. Distribution granulométrique au niveau des trois sites pilotes	155
X.2. Cortège de minéraux argileux des Niayes.....	158
X.3. Variabilité saisonnière de la teneur en eau dans le sol.....	161
X.4. Variabilité des paramètres physico-chimiques (Eh, pH, T°)	164
X.5. Evaluation qualitative et quantitative de la matière organique dans la ZNS	166
X.5.1. Evaluation quantitative de la MO.....	167
X.5.2. Evaluation qualitative de la MO.....	169
X.6. Processus géochimiques et origine de la matière organique des Niayes	173

CONCLUSION DU CHAPITRE X	178
CHAPITRE XI : CHIMIE ET GEOCHIMIE ISOTOPIQUE DES EAUX INTERSTITIELLES DE LA ZONE DES NIAYES	180
XI.1. Variabilité de la chimie des eaux interstitielles	180
XI.1.1. Ions majeurs	180
XI.1.2. Carbone Organique Dissous	187
XI.1.3. Sels nutritifs : Phosphate, Ammonium, Nitrates	190
XI.1.4. Relations de la chimie des eaux interstitielles en rapport avec la fluctuation et la chimie de la nappe	194
XI.2. Processus isotopiques de transfert des eaux dans la zone non saturée.....	199
XI.2.1. Inputs « pluies »	199
XI.2.2. Eaux interstitielles	200
XI.1. Variabilité saisonnière sur la qualité des eaux	203
CONCLUSION DU CHAPITRE XI	207
CHAPITRE XII : ETUDE DES PROCESSUS DE DEGRADATION ET ORIGINE DE LA MATIERE ORGANIQUE : APPLICATION A LA NIAYE DE MBORO.....	209
XII.1. Etude sédimentologique et géochimique.....	211
XII.2. Paramètres physico-chimiques	213
La plus importante épaisseur de tourbes se situe entre 15 et 80 cm au niveau de la station centre. Cette tourbe renferme plus de 50 à 90 % de matière organique (Fall, 1986) à l'état dégradée.	217
XII.3. Teneur en eau des sédiments	217
XII.4. Caractérisation de la Matière Organique.....	218
XII.4.1. Evaluation quantitative de la MO.....	218
XII.4.2. Evaluation qualitative de la MO.....	219
XII.5. Chimie des Eaux interstitielles dans la Niaye de Mboro	222
XII.5.1. Les ions majeurs et le carbone organique dissous.....	222
XII.5.2. Quantification des flux de nutriments (Phosphore, Ammonium) à l'interface eau-sédiment de la Niaye de Mboro.....	225
XII.6. Détermination de la chimie du Phosphore et Fer	227
XII.7. La répartition des formes de Phosphore particulaire dans les sédiments	228
XII.8. Géochimie isotopique des eaux et des sédiments de la Niaye de Mboro.....	231
XII.8.1. Géochimie isotopique des eaux interstitielles	231
XII.8.2. Géochimie isotopique des sédiments : Approche $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ et C/N	232

XII.9. Sources et processus biogéochimiques du carbone et de l'azote	235
XII.10. Evolution de la matière organique : Caractère biodégradable	238
DISCUSSIONS	246
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	246
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	232
ANNEXES.....	XXV



ANNEXES

Annexe I : PARAMETRES CLIMATIQUES

TABLEAU I-1 : Evapotranspiration moyenne mensuelle potentielle (mm) pour la période 1981-2012 par la méthode de Turc

ETP-Turc	Janv	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	ETP_T	P_T
Thiès	968	1309	1233	1287	1109	950	822	712	682	882	994	880	11830	447,4
Louga	889	1234	1249	1331	1175	983	875	836	801	994	1067	877	12310	289,0
Saint-Louis	773	1243	1050	1037	827	571	601	676	651	815	858	769	9870	257,5

TABLEAU 2 : Evapotranspiration annuelle de 2003 à 2013 par la méthode de Turc

ETP-Turc	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Thiès	1579	1530	1544	1588	1723	1701	1722	1583	1682	1526	1592
Louga	1580	1533	1543	1590	1727	1707	1717	1594	1693	1530	1598
Saint-Louis	1501	1441	1505	1510	1480	1532	1514	1488	1590	1451	1547

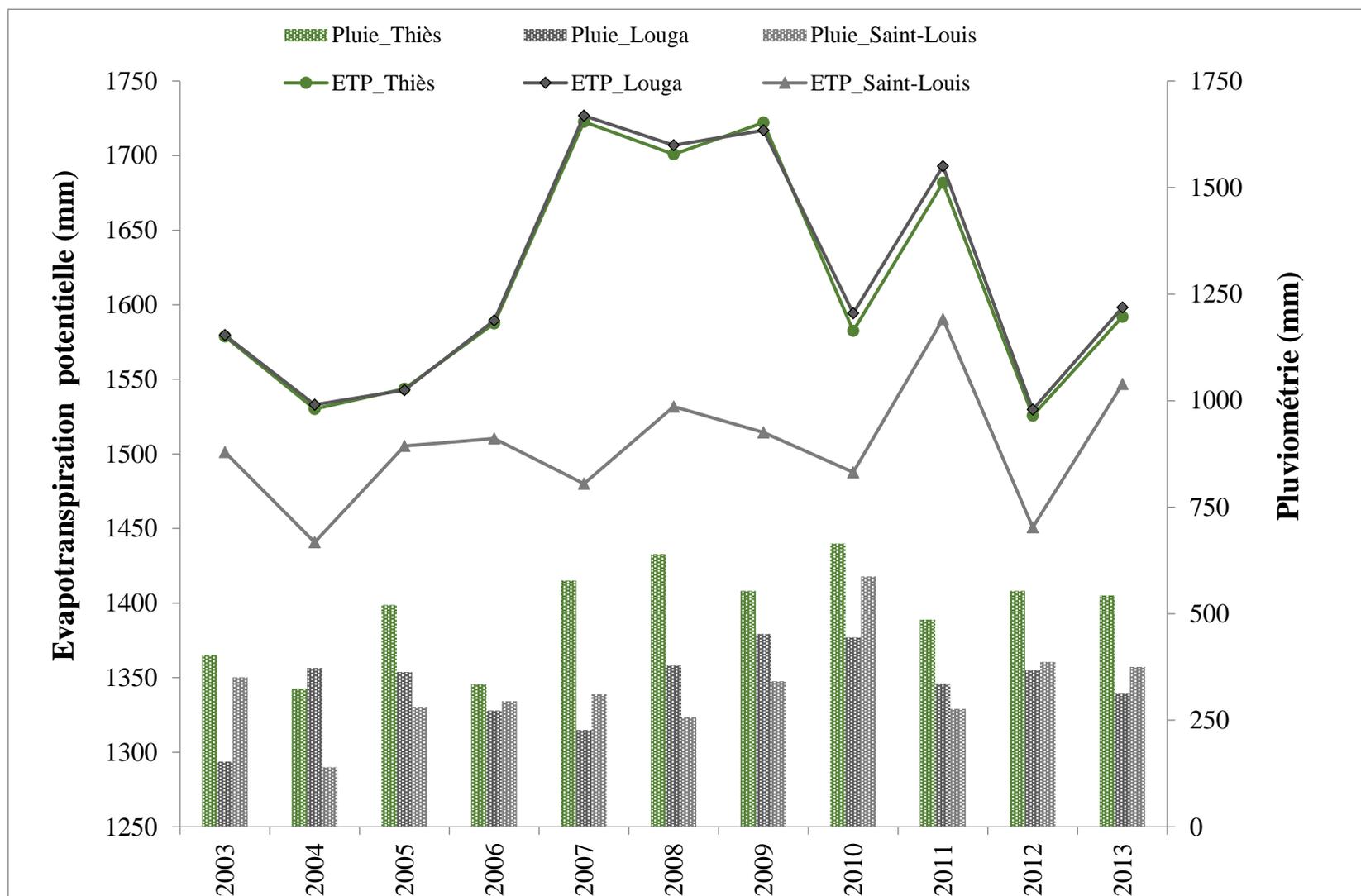


FIGURE I-1: Variabilité de l'ETP et de la pluie dans les stations de Thiès, Louga et Saint-Louis (2003-2013)

Annexe II : DONNEES STATISTIQUES

TABLEAU II-3 : Matrice de corrélation issue de l'Analyse en Composantes Principales des données hydrochimiques des eaux souterraines du Littoral Nord en 2010 et 2011

07-2010	Ca	Mg	Na	K	NH4	HCO3	Cl	SO4	NO3
Ca	1								
Mg	0,947	1							
Na	0,558	0,472	1						
K	0,584	0,527	0,845	1					
NH4	0,712	0,757	0,230	0,330	1				
HCO3	0,124	-0,071	0,290	0,187	-0,176	1			
Cl	0,513	0,418	0,989	0,828	0,147	0,343		1	
SO4	0,826	0,920	0,175	0,219	0,824	0,257	0,102	1	
NO3	-0,068	-0,061	-0,072	0,124	-0,012	0,094	-0,095	-0,078	1

06-2011	Ca	Mg	Na	K	NH4	HCO3	Cl	SO4	NO3
Ca	1								
Mg	0,873	1							
Na	0,480	0,356	1						
K	0,539	0,379	0,880	1					
NH4	0,322	0,235	0,432	0,518	1				
HCO3	0,231	-0,106	0,340	0,407	0,646	1			
Cl	0,401	0,287	0,984	0,842	0,440	0,372	1		
SO4	0,803	0,927	0,152	0,192	0,127	-0,259	0,069	1	
NO3	0,237	0,182	0,167	0,303	-0,203	-0,034	0,064	-0,006	1

TABLEAU II-4 : Matrice de corrélation issue de l'Analyse en Composantes Principales des données hydrochimiques des eaux souterraines du Littoral Nord en Février et Octobre 2012

02-2012	Ca	Mg	Na	K	NH4	HCO3	Cl	SO4	NO3
Ca	1								
Mg	0,978	1							
Na	0,611	0,635	1						
K	0,521	0,550	0,501	1					
NH4	0,197	0,118	0,004	0,203	1				
HCO3	0,115	0,048	0,360	0,199	0,177	1			
Cl	0,593	0,619	0,953	0,342	-0,123	0,221	1		
SO4	0,949	0,941	0,418	0,464	0,274	-0,096	0,388	1	
NO3	0,467	0,505	0,785	0,762	-0,119	0,231	0,728	0,271	1

10-2012	Ca	Mg	Na	K	NH4	HCO3	Cl	SO4	NO3
Ca	1								
Mg	0,946	1							
Na	0,739	0,648	1						
K	0,659	0,530	0,762	1					
NH4	0,204	0,256	-0,085	-0,098	1				
HCO3	0,327	0,226	0,486	0,455	-0,173	1			
Cl	0,711	0,651	0,973	0,644	-0,134	0,438	1		
SO4	0,827	0,893	0,434	0,422	0,464	0,159	0,380	1	
NO3	0,641	0,510	0,615	0,649	-0,203	0,212	0,604	0,197	1

Annexe III : Indice de saturation des eaux

TABLEAU II-5 : Indice de saturation moyen des familles chimiques des eaux souterraines en fonction des saisons NB: Campagne 1 Juillet 2010 (Familles C1_1 à C4_1), Campagne 2 Juin 2011 (Famille C1_2 à C4_2), Campagne 3 Février 2012 (Famille C1_3 à C4_3) et Campagne 4 Octobre 2012 (C1_4 à C4_4)

Classe	Is Anhydrite	Is Aragonite	Is Calcite	Is Dolomite	Is Gypsum	Is Halite
C1_1	-0,79	-3,72	-3,58	-7,12	-0,57	-6,86
C2_1	-2,61	0,37	0,51	0,90	-2,39	-5,01
C3_1	-1,66	-2,35	-2,21	-4,45	-1,44	-6,22
C4_1	-3,17	-1,90	-1,76	-3,66	-2,95	-7,43
C1_2	-0,77	-3,70	-3,56	-7,07	-0,55	-6,87
C2_2	-3,50	0,16	0,30	0,47	-3,29	-5,09
C3_2	-1,95	-1,94	-1,80	-3,73	-1,73	-6,35
C4_2	-3,31	-1,96	-1,82	-3,79	-3,09	-7,49
C1_3	-0,84	-2,03	-1,89	-4,11	-0,62	-7,54
C2_3	-1,57	-1,55	-1,40	-3,10	-1,35	-6,62
C3_3	-3,81	-3,74	-3,60	-7,29	-3,59	-8,21
C4_3	-2,99	-2,92	-2,78	-5,88	-2,77	-7,84
C1_4	-0,64	-2,72	-2,57	-5,18	-0,42	-6,57
C2_4	-1,43	-1,51	-1,37	-2,85	-1,21	-5,65
C3_4	-1,92	-1,24	-1,10	-2,36	-1,70	-6,27
C4_4	-3,67	-2,58	-2,43	-5,18	-3,45	-7,56

Annexe IV : Bilan Hydrologique

TABLEAU IV-6 : Bilan Hydrologique dans le secteur de Louga par la méthode de Thornwaite

										CSE 100	CSE 125	CSE 150	CSE 200	CSE 250
Saint-Louis	Pluie (mm)	T (°C)	ETP (mm)	ETR (mm)	Stock 1	Stock 2	Stock 3	Stock 4	Stock 5	I (mm)	I (mm)	I (mm)	I (mm)	I (mm)
Janvier	2,3	23,4	58,5	3,7	1,6	2,4	3,1	4,6	6,2	0	0	0	0	0
Février	0,9	24,6	68,4	2,5	0	0,5	1,3	2,8	4,3	0	0	0	0	0
Mars	0,2	25,4	75	0,2	0	0	0	0,3	1,8	0	0	0	0	0
Avril	0,1	24,7	69,2	0,1	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0
Mai	0,2	25,2	73,1	0,2	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0
Juin	6,1	26,7	85,9	6,1	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0
Juillet	44,9	27,9	97,8	40,6	4,3	4,2	4,3	4,3	4,3	0	0	0	0	0
Aout	90,3	28,6	105	81	13,6	13,2	13,6	13,6	13,6	0	0	0	0	0
Septembre	97,8	29,1	109,8	77,8	27,4	28,6	30,9	32,9	33,5	6,1	4	2,6	0,6	0
Octobre	19,1	29,1	110,4	41	5,4	7	8,7	10,7	11,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0
Novembre	0,1	27,2	91	5,2	0,3	1,1	1,9	3,4	4,1	0	0	0	0	0
Décembre	0,3	24,6	67,7	0,6	0	0	0	1,1	1,8	0	0	0	0	0
	262		1011,9	258,8	52,6	56,8	63,7	73,6	80,9	6,2	4,1	2,7	0,7	0

TABLEAU IV-7 : Bilan Hydrologique dans le secteur de Saint-Louis par la méthode de Thornwaite

										CSE 100	CSE 125	CSE 150	CSE 200	CSE 250
Louga	Pluie (mm)	T (°C)	ETP (mm)	ETR (mm)	Stock 1	Stock 2	Stock 3	Stock 4	Stock 5	I (mm)	I (mm)	I (mm)	I (mm)	I (mm)
Janvier	0,3	24,3	55,6	1,7	1,6	2,4	3,1	4,6	6,2	0	0	0	0	0
Février	1	26	68,7	2,6	0	0,6	1,3	2,9	4,4	0	0	0	0	0
Mars	0,5	27,4	80,9	0,5	0	0	0	0,2	1,7	0	0	0	0	0
Avril	0	27,9	85,8	0	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0
Mai	0,7	28,9	95,2	0,7	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0
Juin	9,2	29,2	97,9	9,2	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0
Juillet	51,9	29,1	96,9	47,7	4,1	4,1	4,1	4,1	4,1	0	0	0	0	0
Aout	122,1	29	96,7	85	36,1	38,9	40,4	41,2	41,2	5,1	2,3	0,8	0	0
Septembre	90,8	29,3	99,8	84,9	37,3	42,2	44,3	46,6	47,1	4,7	2,6	2,1	0,5	0
Octobre	22	30,3	110,5	54,9	4,5	7,6	9,3	11,7	12,2	0	0	0	0	0
Novembre	1	28,4	90,6	5,4	0	2	0	0,3	0,9	0	0,1	0	0	0
Décembre	0,3	25,5	65,1	0,3	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0
	299,8		1043,8	293	83,7	99,2	102,6	111,6	117,8	9,8	5,1	2,9	0,5	0

Annexe V : Article Scientifique « Spatial and seasonal variability of groundwater hydrochemistry in the Senegal North Littoral aquifer using multivariate approach » (Kaba et al., 2016)

Article scientifique

Spatial and seasonal variability of groundwater hydrochemistry in the Senegal North Littoral aquifer using multivariate approach

M. Kaba^{1,2} · V. Mesnage² · B. Laignel² · I. Mall¹ · C. Stumpp³ · P. Maloszewski^{3,4} · S. Faye¹

Received: 28 November 2015 / Accepted: 27 February 2016
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

Abstract The Senegal North littoral aquifer bears considerable groundwater resources that face both natural and anthropogenic constraints due to proximity of the ocean and numerous socio-economic activities in this semi-arid region. The present study aims to understand spatial and seasonal hydrochemistry variability of this groundwater. Chemical data were analyzed with statistics methods such as Principal Component Analysis and Hierarchical Classification Analysis to classify water types and to decipher geochemical processes. A set of 32 wells was repeatedly sampled in four campaigns between 2010 and 2012 and chemically analyzed in addition to rainwater samples. Results exhibited five water types viz Ca–SO₄, Na–Cl/SO₄, mixed-Cl/SO₄, mixed-HCO₃/Cl and Ca–HCO₃ geographically discriminated in the study region. The last two water types dominate; they occur mostly in the central and eastern part of the aquifer. Whereas the first two highly mineralized classes occur in the narrow coastal strip zone. Natural processes such as dissolution of evaporite minerals

(gypsum, halite), carbonate minerals (calcite, dolomite), exchange reaction in addition to anthropogenic sulphate (from mining industry) and nitrate (from agriculture) inputs are the likely dominant processes that control the water chemistry. Chemical changes proceed according to seasonal variability as infiltrating waters reach the water table. The mean global mineralization which is higher in October in post-rainy season (818 µs/cm) and lower in February in the mid of dry season (640 µs/cm) suggests dilution process through delayed recharge. The environmental isotope ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, ^3H) measurements further revealed that groundwater in the system is relatively well-mixed as shown by the measured range of values. However, deviation from the rainwater signature indicates combined effect of evaporation processes which may occur at the top surface and in the unsaturated zone during infiltration and also mixing with anthropogenic contribution to the aquifer. Tritium contents in the system compared to those of rainwater confirm differences in infiltration rates where the northern central zone with low ^3H contents suggests water prior to thermonuclear bomb test era between 1952 and 1953.

✉ S. Faye
serigne.faye@ucad.edu.sn

- ¹ Département de Géologie, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, BP. 5005, Dakar-Fann, Sénégal
- ² Laboratoire M2C, CNRS UMR 6143/FR CNRS SCALE 3730/UFR des Sciences et Techniques, Université de Rouen, Place Emile Blondel Bat. Irese A, 76821 Mont-Saint-Aignan, France
- ³ Institute of Groundwater Ecology, Helmholtz Zentrum München, Ingolstädter Landstrasse 1, 85764 Neuherberg, Germany
- ⁴ Department of Hydrogeology and Engineering Geology, AGH University of Science and Technology, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Krakow, Poland

Keywords Groundwater · Statistical analysis · Geochemical processes · Environmental isotopes · Littoral Senegal

Introduction

Coastal areas are often highly vulnerable due to the combined effects of natural and anthropogenic pressures (Chkir et al. 2008; Giambastiani et al. 2013). They are characterized by high population growth due to many socio-economic activities, thus high water demand. In Sahelian

zone, such as Senegal, the issue is more pronounced and local population faces shortage of water for drinking as well as other usages. This is due to low groundwater replenishment, lack of surface water (Gaye 1990) and also groundwater over-exploitation that result in seawater intrusion and deterioration of the chemical water quality (Zghibi et al. 2013). In addition, human impact with domestic and industrial wastewater, agriculture return flow and farming may also contribute to deteriorate the groundwater quality. In total, groundwater availability both in terms of quantity and quality may be jeopardized and sustainability could be under serious threat.

The North littoral aquifer which is of concern in this present study contributes 100,000–130,000 m³/d to the drinking water supply distribution of the capital city Dakar and surrounding areas (IDEV-ic 2011). It is located in the northern coastal strip from Kayar to Saint-Louis. This area is subject to high agricultural and industrial anthropogenic pressure. More than 80 % of national vegetable production is met from this region (Cissé et al. 2006) due to favorable settings of wetland depressions. This region also bears the impact of phosphate mineral mining (since 1950) and mineral sands deposit (Zircon, Titanium, Ilmenite) mining from 2014. These activities present potential threat to the groundwater resource in the region.

Geochemical processes that govern chemical changes in many contexts have been identified by many authors (Alther 1979; Reeve et al. 1996; Adams et al. 2001; Alberto et al. 2001) as well as discrimination between natural and anthropogenic processes (Birke and Rauch 1993; Helena et al. 2000; Güler et al. 2012; Dragon and Gorski 2015). Previous studies focused on quantitative assessment of the North Littoral groundwater and hydrochemical changes. With regard to groundwater evaluation, a hydrodynamic model was carried out taking into account new exploitation constraints (Faye 1995). Results revealed that groundwater is mainly fed by rainfall infiltration and discharges seaward. Increased abstraction rates of about 50,000 m³/day provoked saline intrusion towards the north–western part where head level is close to reference sea level. Edmunds and Gaye (1994) investigated North Littoral groundwater recharge with chloride mass balance (CMB) in both unsaturated and saturated zone. They reported that high variability in groundwater replenishment is mainly due to sand texture, monsoonal rain, and coastal influence as well as past climate conditions. Values reported vary from nil to a mean of 10 mm/year comparing to the calibrated 5 mm/year used in the model. In terms of water quality, Kane (1995) investigated the hydrochemical characteristics of the groundwater and revealed occurrence of potable water in most parts of the system except in some

localized wells where human and especially pastoral activities around well heads could have contaminated the groundwater with NO₃ up to 400 mg/l.

This present study aims at reassessing groundwater chemistry changes in this region in the light of new environmental and socio-economic constraints by using statistical tools to explain clustering of water types and geochemical processes induced. Thus, the objective of this work is to classify groundwater chemical types and assess its spatio-temporal variability in relation to sources and mineralization processes. The methodology used combines conventional chemical techniques and statistical approaches such as Hierarchical Classification Analysis (HCA) by Q mode method and Principal Component Analysis (PCA) for a set of 32 points sampled during four campaigns. The HCA method determines chemical water types in organized and structured clustering; while the PCA statistical approach has the advantage in taking into account variable number and influence of each parameter. This latter reduces the size of these variables from correlation between variables and individuals considered by determining covariance matrix and involvement of each parameter on water geochemistry. The powerfulness of these statistical tools which lies in determining types of relationships between variables (chemical parameters) and individuals (sampling stations) will help to infer chemical groundwater classes and their related geochemical processes.

Study area

Location

The study area is located in the north western part of Senegal between latitudes 15°00' and 16°08' North and longitude 16°13' and 17°17' West (Fig. 1). It covers a coastal strip of approximately 2300 km² from Kayar and Saint Louis.

The geomorphologic setting characterizing the study area features a succession of coastal sand dunes and depressions locally called “Niayes”. The sand dunes system is composed of recent marine dunes fixed by casuarinas plant in the coastal strip and the inland Ogolian red to yellowish dunes rich in iron hydroxide. Between these dunes, the low lying depression named “Niayes system” occurs. It represents a wetland (due to shallow groundwater table) made up of hydromorphic soils rich in clays and organic matter where intense horticultural activities take place. Surface water network occurs mostly in the North–western part which is part of the Senegal River delta system and in the Niayes system.

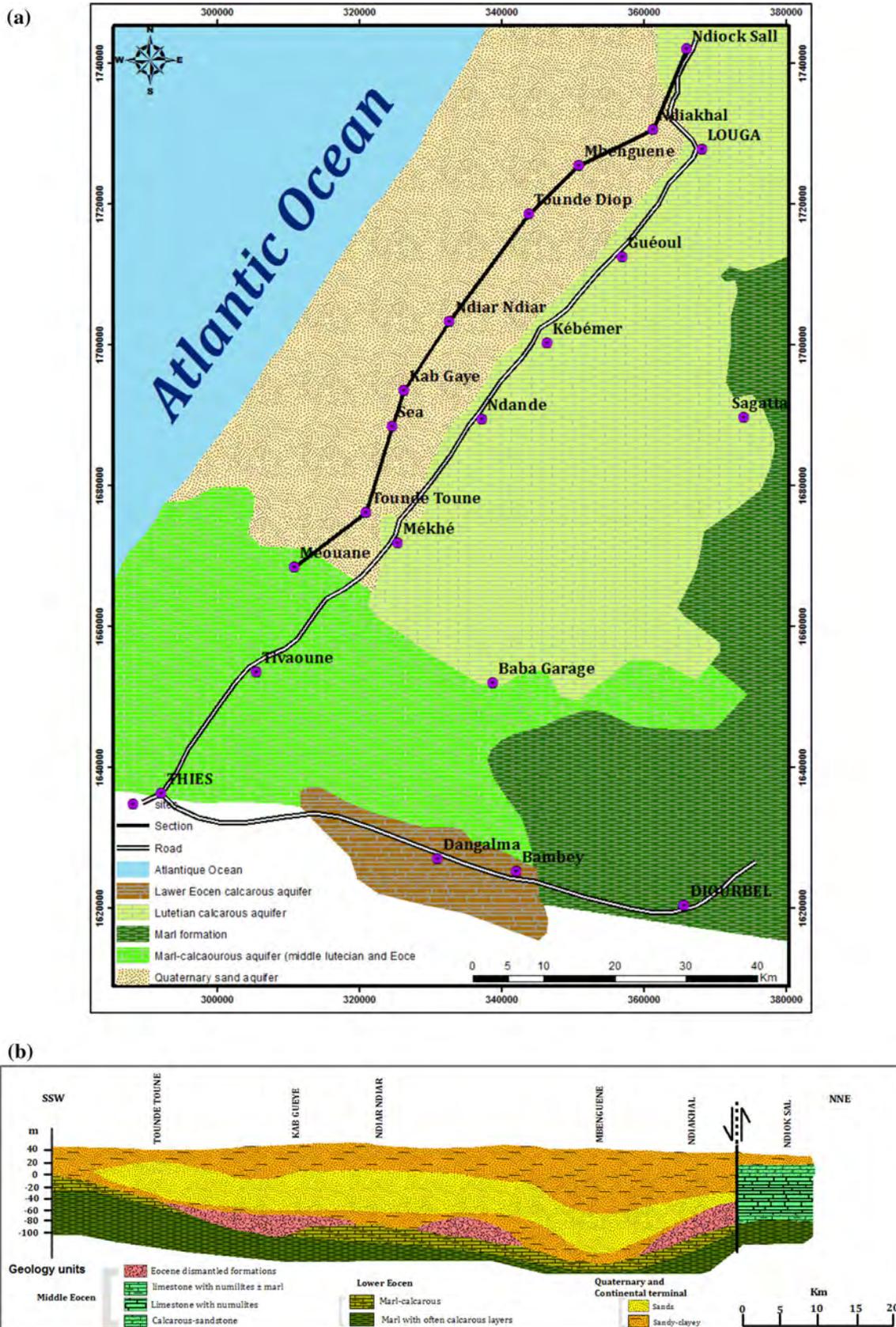


Fig. 1 Geological setting in North Littoral in Senegal [geological map (a) geological cross section NNE-SSW (b)]

Geology and hydrogeology context

Geologically, this area belongs to the western part of the Senegalo-mauritanian sedimentary basin containing formations dated from Cretaceous to Quaternary. With regard to the objective of the study, we focus mainly on the top layers which are represented by the western Quaternary sandy to sandy-clay sediments and the eastern limestone formations of Eocene age (Fig. 1a). The quaternary sediments, which consist of the two sand dune ridges, are made up of various sand textures with variable clay and silt contents, and frequent occurrences of ferruginous layers and peat in the Niayes (Noel 1978). Sand sediments analyzed during the course of this investigation and work from Faye et al. (1992) revealed that quartz minerals are dominant; they are associated with various clays such as kaolinite and to a lesser extent illite, montmorillonite and smectite. Towards the East, the karstic lutetian formation of around 100 m thickness is in contact with quaternary sandstone formation through a fault.

Based on this configuration, the hydraulic system comprises two main aquifers, the quaternary sands in the West and Lutetian karstic limestone to the East hydraulically connected (Fig. 1a, b). The quaternary sand aquifer lies on an irregular marly basement of lower Eocene with altitude varies from +10 m in the South to -110 m in the North. Hydraulic conductivity values are between 2.8×10^{-5} and 8.5×10^{-4} m/s. The highest values are in the axial zone of the quaternary sand aquifer. Besides, transmissivity values vary in the same order of magnitude between 1 and 3.5×10^{-5} m²/s in the axial zone, and between 1.3×10^{-3} and 9.7×10^{-4} m²/s around (GKW Consult 2009). Groundwater recharge occurs mainly by rainfall direct infiltration and also from agricultural return flow. The piezometric head distribution of the quaternary aquifer shows flow directions from a dome of +25 m high located in the South West towards the North to reach 0 m to even below Mean Sea Value, and towards the ocean and the limestone aquifer where heads lowered to 0 and 1 m, respectively (Fig. 2). Compared to values measured from previous studies in 1965, 1985 and 1995 (Faye et al. 1997; Kane 1995), head in the piezometric dome has continuously declined from 35 to 24 m due to the combined effects of rainfall deficit and pumping rates for drinking water supply in this system.

Climate

The climate is a coastal sahelian type with a rainy season that lasts 3 months from July to September. Climate changes are dependent on air masses of the Harmattan from the North and of the Monsoon from the South. The average

annual rainfall from 1960 to 2011 varies from 358 (± 123) mm in the southern part at Mboro station to 264 (± 105) mm in northern part at Saint Louis station with a decreasing spatial gradient. The standard deviation reflects the high inter-annual rainfall variability. Rainfall record shows a humid period from 1960 to 1969 and a drought period from 1970 to 2004. From 2005, variability is more pronounced for these two stations. Evaporation is high in the coastal zone ranging from 1699 mm/year in the North to 1787 mm/year in the South (Gaye 1990).

Materials and methods

Sampling and laboratory protocols

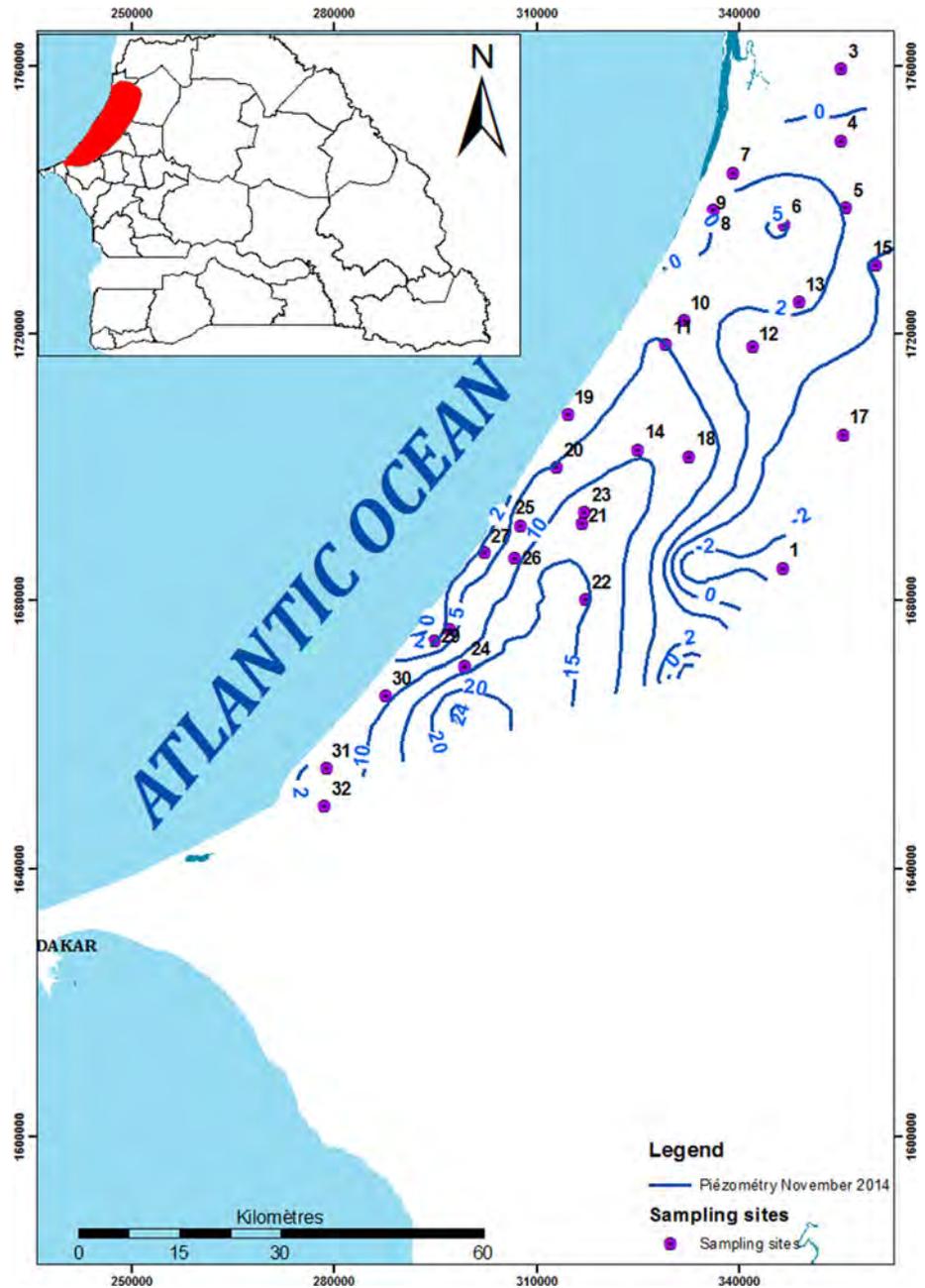
Four sampling campaigns were carried out during the course of this study: July 2010 (campaign 1), June 2011 (campaign 2), February 2012 (campaign 3) and October 2012 (campaign 4). The two first campaigns were at the end of the dry season while the third and fourth campaigns took place, respectively to mid dry and end of the rainy seasons. The set of samples collected is likely to depict seasonal variability of the groundwater system. 32 groundwater were sampled during each of the four campaigns from boreholes, piezometers and dug wells across the study area (Fig. 2) giving a total of 128 measurements. In addition, rainwater samples were also collected during 2012 rainy season for isotopic analyses.

Alkalinity and physical parameters such as electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), temperature and pH of the samples were measured in the field using a multi-parameter probe (Consort). For groundwater samples, piezometers were purged until stable readings for the physical parameters were obtained. Samples were subsequently filtered through 0.45 μ m membrane and collected in acid-washed, well-rinsed polyethylene bottles. Filtered and acidified (1 % v/v HNO₃) samples were used for major cations, while filtered unacidified samples were used for anion analysis. Unfiltered water samples were collected in 1-l polyethylene tightly sealed bottles and preserved for environmental isotopes. All samples were cooled prior to analyses.

Chemical analyses of major ions (Ca²⁺, Na⁺, Mg²⁺, NH₄⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻) were performed at M2C laboratory in Rouen using ion chromatography (Methrom). The accuracy of analyses was estimated from the ionic balance error which was within ± 5 % for all samples.

Isotopic analyses were performed for 19 rainwater samples collected during 2012 rainy season, 18 and 27 groundwater samples collected during February 2012 and October 2012 campaigns, respectively, at the Helmholtz Zentrum München, Institute of Groundwater Ecology

Fig. 2 Sampling stations and groundwater piezometric level in November 2014



(Neuherberg/Germany). Stable isotopes of oxygen and hydrogen were determined using a water isotope analyser (LS210-I, Picarro Inc., Santa Clara, CA, USA). Both $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ values were determined relative to internal standards that were calibrated using Vienna-Standard Mean Ocean Water (V-SMOW). The data were normalized following Coplen (1988) as followed:

- $d = [(RS/RV\text{-SMOW}) - 1]/1000$, where RS represents either the $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ or the $^2\text{H}/^1\text{H}$ ratio of the sample, and
- RV-SMOW is $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ or the $^2\text{H}/^1\text{H}$ ratio of the V-SMOW.

The analytical reproducibility was $\pm 0.1\%$ and $\pm 1.0\%$ for the oxygen and deuterium, respectively. Tritium analyses were performed by electrolytic enrichment and liquid scintillation counting method (Thatcher et al. 1977), and values are reported in ^3H units (TU) with average uncertainty of ± 0.7 TU.

Multivariate statistical analysis

Statistical analysis (Hierarchical Classification Analysis (HCA) and Principal Component Analysis (PCA) were

performed using XLSTAT and R software. The HCA is a method of classifying a set of hydrochemical data into two or more independent groups, based on the combination of interval variables, so as to identify a system of organized data groups that share common properties. These latter can be interpreted in terms of aquifer types, subsurface residence time, and anthropogenic input on groundwater chemistry. This technique provides a good opportunity for identifying relatively distinct paths of hydrochemical modeling and for understanding the geochemical evolution of a given aquifer system. The HCA method uses the squared euclidean distance between the different hydrochemical variables, and the data sets are analyzed in Q-mode where clustering is performed by the average linkage between groups (Ashley and Lloyd 1978). The output results are represented in the form of a dendrogram. Data treatment procedures and detailed explanation of the HCA clustering technique are well documented by Brown (1998) and Güler et al. (2002) and the pertinence of multivariate techniques in hydrogeochemical studies are discussed in details by Brown (1998), Swanson et al. (2001), Güler et al. (2002) and Demlie et al. (2007).

The advantage of PCA analysis is that rather than examining two variables at a time in an x vs. y plot or perhaps 3 variables in a 3D plot (x , y and z), all the variables from a data set can be examined simultaneously. Mathematically, there are no limits when calculating more than 3 dimensions. In PCA, a set of interrelated variables is mathematically transformed into a new co-ordinate system on which the axes (principal components) are linear combinations of the original variables and are mutually non-correlated. The newly transformed variables account for the same information or variance as the original variables do. The only difference is that the first axis accounts for (as much as possible) the variance. The second axis accounts for the remaining variance while being non-correlated with the first axis and so forth. The variables and the axis are weighted in proportion to the amount of the total variance that they describe. Often, the first two principal components generally describe most of the information in the data set (Laaksoharjua et al. 1999). Contribution of each element on this axis depends of the radius assigned to the element on the correlation circle.

Results and discussion

Groundwater quality assessment

Evaluation of the physico-chemical and chemical characteristics was performed using descriptive statistic approach where minimum, maximum, average and standard deviation of major ions were computed for each campaign

(Table 1). Values are in the same order of magnitude for all sampling campaigns with campaign 3 generally having lower values. Chemical characteristics show abundance trends of $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ for cations and $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$ for anions for campaigns 1, 2 and 4 as well as high variability between minimum and maximum. While samples collected during campaign 3 exhibit higher average HCO_3^- contents and lower Cl^- probably due to recharge processes. Concentrations of SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ and to a lesser extent Na^+ are higher for campaign 4 resulting probably from dissolution of evaporite (gypsum, halite), carbonate minerals (calcite, dolomite) and perhaps agriculture return flow.

The EC values are highly variable ranging from 162 to 3590 $\mu\text{S}/\text{cm}$ where maximum values were measured in wells 2, 8, 30 and 27 (Fig. 2) characterized by agricultural activities. The mean pH values are slightly acidic; however, lower values (pH 4–5) were measured in agricultural and mining zones in the south-western part of the aquifer.

In total, groundwater quality in the study area meets WHO requirements except in some locations where concentrations of NO_3^- , NH_4^+ , Cl^- , SO_4^{2-} are relatively high due to the conjunction of human impacts such as agriculture return flow (pesticides, fertilizers), pastoral activities at well heads.

By scrutinizing data from the 4 campaigns (Tables 1, 2, 3), the chemical characteristics of the groundwater change to lowest mean values during February (campaign 3) for most of the major elements except for chloride content. The highest ionic contents occur for period spanning from the end of the dry season to the end of the rainy season with mean EC value of 818 $\mu\text{S}/\text{cm}$. The lowest major ions contents and EC values measured during February campaign suggest groundwater dilution derived from rainwater infiltration which reaches lately the water table few months after the end of the rainy season.

Groundwater classification using HCA and PCA

Cluster analysis results

Four distinct clusters were identified with the HCA analyses named herein Cl_1 to Cl_4 for each campaign (Fig. 3). Cluster Cl_1 solely marked by well 30 for all of the 4 campaigns is featured by Ca– SO_4 water type (Fig. 4) and high EC values. Conversely, Cluster Cl_2 solely represented by well 2 during dry season extends to wells 8, 24, 27, 28, 7 and 18 during post rainy season. This cluster defines Na–Cl water type and variable mineralization ranging from 162 to 3500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. The cluster Cl_3 and Cl_4 vary widely in terms of sites and seasons. During dry season, Cl_3 cluster defines wells located mainly in the western part of the aquifer with mixed water types (Cl– SO_4 –Na–Ca). Its water

Table 1 Summary of Statistical hydrochemical data of field campaigns 1, 2, 3 and 4 in North Littoral groundwater (Major ions and WHO standard, 2011 (mg/l), TOC (mg/l), EC (µs/cm), DW (m))

Variable Campaign	WHO	Minimum				Maximum				Average				Standard deviation			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
HCO ₃ ⁻	–	21.1	24.4	5.9	2.4	268.4	366	101.5	264.4	86.7	112.1	37.6	67.8	67.2	78.5	34	69
Ca ²⁺	250	4.8	5.4	1.9	1.5	199.9	204.2	196.9	277.9	40.2	43	28.8	54.6	40.7	43.9	40.7	66.9
Na ⁺	200	9.2	18.8	4.3	5	461.7	430.3	122.2	316.5	64.8	68.2	25.4	75.1	84.3	79.9	25.3	79.6
K ⁺	12	1.5	2.1	2.2	1.5	44.7	61.1	24.7	52.4	8.1	9.5	4.1	10.4	9.7	12.1	4.6	13.7
Mg ²⁺	50	1.9	1.8	0.8	0.3	101.7	103.5	43	119.4	15.2	14.5	6.7	18.8	19.5	18.7	8.9	26.5
Cl ⁻	250	14.6	29.2	7.1	27.2	939.5	820.9	220.3	32.6	111.3	111.3	39.2	29.7	169.7	146.6	42.4	1.5
NO ₃ ⁻	50	0	0	0	0	360.8	104.3	124.8	438.8	47.3	38.1	18.1	56.4	79.6	66.8	33.2	108.7
NH ₄ ⁺	1.5	0	0	0	0	4	11.3	4.5	3.9	0.7	0.9	1	0.5	1.1	2.5	1.2	1.1
SO ₄ ²⁻	250	0.7	0.9	0	0	938.4	969.1	666.8	1117	87.3	85.7	60.6	102.3	176.5	179.1	126.1	208.4
EC	<1500	192	190	184	162	3590	2920	2090	2320	743.1	683.8	639.7	818.4	730.2	609.3	482.3	735.7
pH	6.5–8.5	4.1	3.9	3.6	4.1	7.7	7.8	7.9	9.9	6.4	6.2	5.9	6.5	0.9	1.1	1	1.3
DW	–	3.6	2.9	2.9	2.3	37.4	37.5	37.7	37.6	17.9	17.7	17.6	17.8	12.9	12.9	12.8	12.9
TOC	–	0	0	0	0	5.4	13.4	10.9	25.2	0.9	1.8	1.7	3.3	1.4	3.4	2.9	5

type shifted to Na–Cl and lower EC in transition period and post-rainy season and accounts for wells located mostly in the western and central part of the aquifer. The Cl₄ cluster featured the lowest mineralization (EC between 313 and 635 µS/cm) and mixed water types (Na–Ca–Cl–HCO₃) mainly located in the central and western part. Samples collected during February (third sampling campaign) did not discriminate Cl₃ and Cl₄; this probably reflects maximum recharge occurring during this period.

The four clusters based on the chemical parameters indicate temporal variability in terms of groups and chemical characteristics except for cluster Cl₁. This latter represents well 30 which is located south west of the study area. It is characterized by a shallow water Table (4 to 5 m depth), low pH (4–5), and high mineralized Ca–SO₄ water probably derived from gypsum dissolution. This part of the region is geomorphologically represented by ancient saline lagoons which went dried due to high evaporation. The variable mineralization Na–Cl water type depicted for cluster Cl₂ is probably derived from seawater intrusion for wells located in the coastal strip. In these wells, depths to the water table are shallow and EC values vary seasonally according to mass water flow. While wells located eastward with lower EC values, the Na–Cl water type may result from clay exchange reaction due to longer residence time in addition to chloride derived from sea spray and anthropogenic sources. Processes involved in cluster Cl₃ imply contribution of SO₄²⁻ derived from release of sulphur gases from the phosphate chemical Industry (producing phosphoric and sulfur acid) operating in the south western part of the study area which get oxidized and enter into the system during rainwater infiltration in addition to gypsum

dissolution which a likely process in the Niayes zone. The relatively high chloride contents in this area could be from sea spray and also irrigation return flow in the Niayes zone. The Cl₄ cluster marked by low mineralized mixed water type located in the central and eastern part of the aquifer reflects both cations and anions exchange reactions along the down gradient flow where Na⁺ and Cl⁻ gradually replace Ca²⁺ and HCO₃⁻ at clay minerals surface. Whereas, the Ca–HCO₃ water type which characterized wells sampled in the eastern limestone aquifer results mostly from calcite dissolution reaction.

Spatial and seasonal variability of groundwater hydrochemistry in North Coast

The statistical study performed by PCA for the set of data collected for the 4 campaigns considers the first two axes F1 and F2 which represent between 71 and 76 % of the total variance. The first axis F1 which accounts for 46–56 % of the total variance features great contribution of most of the ions (Na⁺, K⁺, Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻) in the mineralization processes as shown by the radius length except for HCO₃⁻, NH₄⁺ and NO₃⁻ which are variably affected by F2 axis (Fig. 5). The representation shows observations of hydro-chemical variables and samples sites affected in dry season (Fig. 5a), and transition and post-rainy period (Fig. 5b), respectively. The alkaline earth ions (Ca²⁺, Mg²⁺) which are opposed to alkaline ions (Na⁺, K⁺) in the F2 axis depict either different processes involved and/or exchange reactions between monovalent and bivalent ions. Projection of sampling sites in the PCA diagram confirms the four classes with variable populations

Table 2 Set of chemical data for campaigns 1 and 2 (depth water: DW (m), electrical conductivity EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$), major ions (mg/l), total organic carbon TOC (mg/l))

No	ID	DW1	DW2	EC 1	EC 2	pH 1	pH 2	Cl ⁻ 1	Cl ⁻ 2	HCO ₃ ⁻ 1	HCO ₃ ⁻ 2	NO ₃ ⁻ 1	NO ₃ ⁻ 2	SO ₄ ²⁻ 1
1	Thiat	35.2	35.2	533	603	7.5	7.7	18.5	20.4	195.2	366.0	6.6	0.4	15.3
2	KMD	19.1	19.0	3590	2920	7.7	7.5	939.5	820.9	268.4	292.8	6.3	0.0	17.9
3	SemP	7.5	5.6	585	779	7.2	6.3	143.3	220.5	48.8	85.4	0.8	0.6	19.8
4	KhomD	12.2	12.2	192	189.9	7.3	6.4	38.2	37.9	21.11	85.4	1.9	0.6	8.1
5	Diadj	29.0	28.9	242	220	6.9	7.0	31.3	32.5	170.8	195.2	9.2	13.0	2.2
6	NdFall	26.9	28.8	458	439	6.9	6.7	90.7	66.7	97.6	61.0	2.1	1.6	11.8
7	Mour	5.3	3.5	2180	956	6.4	5.1	382.3	157.8	48.8	36.6	79.6	1.6	229.2
8	Potou	6.9	6.4	775	1005	6.6	6.4	113.1	179.1	61.0	97.6	58.3	104.3	58.1
9	Kcoura	8.2	9.0	341	396	6.5	6.4	34.2	46.6	24.4	61.0	48.2	71.9	36.7
10	Bendio	10.1	10.1	352	299	6.5	5.6	54.8	58.7	36.6	97.6	1.5	0.3	46.0
11	Petio	11.9	12.1	348	393	6.7	5.7	61.2	77.7	73.2	73.2	46.0	67.3	2.1
12	Tound	33.9	33.9	256	230	6.3	6.1	49.4	48.9	97.6	73.2	0.3	0.2	3.6
13	SMBeng	35.8	35.7	221	209	6.4	6.2	48.9	49.3	48.8	85.4	1.5	1.4	4.4
14	Teure	11.7	11.7	672	255	4.2	4.6	28.2	29.1	24.4	73.2	224.3	35.8	40.9
15	NiaPe	36.5	32.4	367	233	7.0	8.3	50.8	33.8	146.4	122.0	15.3	0.4	2.7
16	WarC	35.1	35.1	729	667	7.4	7.3	67.5	70.2	219.6	207.4	31.2	30.3	3.4
17	Thiek	37.1	37.2	538	526	7.2	7.2	46.7	49.4	185.4	219.6	10.6	13.0	5.9
18	Nguer	36.7	37.0	225	203.4	6.6	6.1	25.7	31.1	219.6	73.2	360.8	2.3	15.2
19	Lomp	4.7	4.6	521	686	5.5	6.7	44.2	107.5	61.0	146.4	0.4	22.1	104.4
20	Diourm	5.8	5.8	1265	996	5.7	3.9	175.5	153.2	24.4	48.8	8.7	1.8	273.4
21	TawaF	19.9	20.0	221	182.8	6.1	5.8	28.8	29.2	73.2	48.8	3.4	1.6	23.6
22	TawaM	33.2	33.4	358	330	6.6	6.4	45.6	46.3	63.4	73.2	51.0	63.2	26.5
23	KabG	37.4	37.5	228	186.4	6.0	5.5	14.2	32.5	48.8	61.0	16.7	32.4	0.7
24	Darou	7.9	7.5	1153	1081	6.3	5.3	104.0	99.4	65.88	48.8	211.8	259.4	151.1
25	MDL	5.1	5.2	1218	1298	4.7	7.8	158.6	202.4	31.72	195.2	57.5	7.7	236.6
26	Ngui	21.2	21.1	376	333	5.9	5.7	38.4	42.1	48.8	109.8	3.1	3.4	80.2
27	Fass	4.0	4.01	822	1812	6.4	6.9	192.1	285.4	73.2	207.4	88.6	253.5	79.6
28	Mbor	3.6	2.9	1528	1214	5.5	4.4	242.8	218.8	63.4	48.8	0.0	0.0	292.6
29	Ndeu	5.8	8.8	488	357	6.7	6.6	93.4	78.5	109.8	97.6	23.1	9.5	24.2
30	NdSao	4.4	4.9	2090	1811	4.1	4.4	86.8	85.6	48.8	24.4	0.0	0.0	938.5
31	Ngadia	7.4	6.6	523	698	6.4	7.5	79.7	115.6	48.8	97.6	42.6	99.0	30.4
32	Thiaye	12.3	11.5	384	373	6.5	6.6	34.4	34.3	24.4	73.2	102.5	120.1	7.8

No	ID	SO ₄ ²⁻ 2	Na ⁺ 1	Na ⁺ 2	NH ₄ ⁺ 1	NH ₄ ⁺ 2	K ⁺ 1	K ⁺ 2	Ca ²⁺ 1	Ca ²⁺ 2	Mg ²⁺ 1	Mg ²⁺ 2	TOC 1	TOC 2
1	Thiat	21.5	24.0	28.0	1.4	11.3	7.1	12.3	55.6	64.1	7.3	8.8	2.3	7.7
2	KMD	2.8	461.7	430.2	0.0	9.1	44.7	61.1	116.9	84.0	39.1	27.3	4.1	10.9
3	SemP	21.6	83.8	124.1	0.0	0.0	4.6	5.8	13.5	18.7	7.5	10.3	0.0	1.5
4	KhomD	8.9	18.5	18.8	0.0	0.3	3.0	2.8	9.0	9.4	4.4	4.2	0.0	0.0
5	Diadj	2.1	18.2	18.6	0.9	0.4	2.0	2.1	15.6	16.4	4.9	5.2	0.1	0.0
6	NdFall	9.2	48.1	34.2	0.0	0.0	3.0	2.6	28.4	22.5	8.8	6.4	0.7	0.1
7	Mour	218.8	185.3	97.4	3.0	0.0	33.8	7.5	103.7	54.7	46.6	25.0	2.3	1.1
8	Potou	88.0	66.2	99.6	0.0	0.0	7.0	11.6	37.1	58.4	15.3	25.6	0.1	0.9
9	Kcoura	37.1	32.0	37.8	0.0	0.0	4.8	6.0	15.5	22.4	8.0	9.2	0.0	0.0
10	Bendio	42.7	34.7	32.0	0.0	0.0	5.4	2.8	15.5	11.6	6.5	6.6	0.1	0.0
11	Petio	3.5	33.1	39.2	0.0	0.0	4.8	4.6	14.4	18.3	7.0	10.5	0.0	0.0
12	Tound	3.1	27.8	25.8	0.4	0.4	3.1	2.6	5.9	6.2	1.9	1.8	0.0	0.0
13	SMBeng	4.1	26.0	26.1	0.0	0.0	2.8	2.8	11.3	11.2	2.2	2.2	0.1	0.0
14	Teure	38.0	19.6	25.9	0.0	0.4	4.2	3.0	31.1	12.0	8.5	3.9	0.4	0.0

Table 2 continued

No	ID	SO ₄ ²⁻	Na ⁺ 1	Na ⁺ 2	NH ₄ ⁺ 1	NH ₄ ⁺ 2	K ⁺ 1	K ⁺ 2	Ca ²⁺ 1	Ca ²⁺ 2	Mg ²⁺ 1	Mg ²⁺ 2	TOC 1	TOC 2
15	NiaPe	6.1	24.0	29.9	0.0	0.4	2.6	3.1	17.5	7.1	7.7	1.9	0.0	0.2
16	WarC	2.7	26.1	25.6	0.0	0.0	2.7	3.9	41.2	53.4	11.5	11.1	0.0	1.5
17	Thiek	4.6	25.0	24.9	0.0	0.0	3.4	2.6	67.2	48.6	8.6	8.4	0.1	0.8
18	Nguer	15.6	17.3	19.5	0.5	0.4	2.2	2.2	13.1	12.8	1.9	2.0	0.0	0.1
19	Lomp	26.4	23.3	52.7	1.8	0.0	2.9	3.9	34.6	58.6	7.3	13.5	0.2	4.0
20	Diourm	244.8	123.7	109.8	2.2	1.6	4.3	5.3	69.1	65.0	22.7	18.4	2.3	2.8
21	TawaF	24.4	24.7	22.5	0.4	0.5	2.6	2.4	6.6	5.4	3.3	3.3	0.0	0.1
22	TawaM	23.1	37.1	35.6	0.0	0.5	9.9	8.1	17.4	19.6	7.1	7.6	0.0	0.0
23	KabG	0.9	9.2	18.9	0.2	0.3	1.5	2.8	4.8	7.6	2.4	4.3	0.0	0.0
24	Darou	140.2	102.0	111.8	2.2	0.0	27.1	27.7	58.6	57.6	27.0	26.6	1.7	1.3
25	MDL	205.4	93.9	136.2	1.9	0.0	7.6	29.5	70.7	115.8	31.3	11.4	2.6	8.1
26	Ngui	81.4	25.9	25.6	0.4	0.3	4.2	3.8	18.5	19.9	10.1	10.5	0.0	0.0
27	Fass	167.9	111.0	190.0	0.0	0.0	8.8	22.7	55.4	139.7	20.2	37.3	5.4	13.4
28	Mbor	261.9	156.2	138.2	3.1	0.0	11.3	12.4	66.5	62.2	32.4	29.1	1.3	0.76
29	Ndeu	20.3	52.5	44.5	0.0	0.0	5.7	3.7	28.3	18.5	4.8	4.1	0.6	0.3
30	NdSao	969.1	69.5	69.5	4.0	3.7	12.7	16.1	199.9	204.2	101.7	103.5	2.2	1.3
31	Ngadia	40.1	50.6	67.6	0.0	0.0	3.6	6.1	20.8	44.4	11.1	16.9	0.5	1.2
32	Thiaye	7.4	24.2	22.5	0.0	0.0	15.6	19.5	22.1	26.0	6.2	7.0	2.3	0.0

for the 4 campaigns. These classes named C1 to C4 are featured by:

- C1 class characterized by high SO₄²⁻ and Ca²⁺ contents is represented by well 30 located in the southern part of the aquifer;
- C2 class which individualizes well 2 (high Cl⁻, Na⁺, K⁺ contents) during dry seasons features during post rainy season wells 8, 24, 27 (mixed water type SO₄-Cl-Ca-Na) and wells 7, 26, 27, 28 (Na-Cl type) for the period October and February, respectively;
- C3 and C4 classes which scatter close to the axis origin are represented by low mineralization and variable water types from Na-Cl, mixed-SO₄, Ca-HCO₃. They represent wells located in the central and eastern part of the aquifer. They are dominantly discriminated by the F1 axis except for the campaign 3 where F2 is more involved. This observation is in concordance with the HCA layout.

Combination of both HCA and PCA approaches allowed classification of groundwater chemical types. These are likely due to both natural and anthropogenic effects which explain their spatial and seasonal variability (Fig. 6) (Tables 2, 3). Results of groundwater sampled during dry season (campaigns 1 and 2) reveal Na-Cl to Na-mixed types located mainly in the west part of the aquifer while the HCO₃-Na and HCO₃-Ca types occur in the central and the western zones. Concerning the campaign 3, most of the groundwater samples exhibit bicarbonate types particularly

HCO₃-Na type in the west part and HCO₃-Ca type in the Eastern part except for well 30 located in the south characterized by the SO₄-Ca-Mg type.

These seasonal changes are likely to derive from geochemical processes such as ion exchange and dissolution reactions together with dilution by rainfall infiltration. The bivariate diagrams in Fig. 7a, b and computed negative saturation indexes of aragonite, calcite and dolomite (-0.27, -0.41 and -0.67) confirmed base exchange, carbonate and sulphate mineral dissolution in addition to anthropogenic inputs from mining industry, agricultural return flow and well head pollution. The positive correlation between cations and bicarbonate (Fig. 7c) in campaign 3 samples confirm dilution with rainwater reaching the groundwater table. The process is governed by soil CO₂ partial pressure reaction with recharging water to lead to bicarbonate water type as follows:



In the West part, particularly in Niayes depressions with shallow groundwater (0-10 m), organic matter degradation and exchange ions with clay-humic complex are prominent. Conversely in the East part, dissolution of carbonate mineral is likely to occur in the karstic system. From the central part of the aquifer towards the coastal zone, the seasonal water type changes occurring along main flow direction from Na-HCO₃ and even Ca-HCO₃ types to Na-Cl or mixed-Cl types result probably to cation and anion exchange reaction (Fig. 6b). As flow proceeds down

Table 3 Set of chemical data of campaigns 3 and 4 [depth water: DW (m), electrical conductivity EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$), major ions (mg/l), total organic carbon TOC (mg/l)]

No	ID	DW 3	DW4	EC 3	EC4	pH 3	pH4	Cl^- 3	Cl^- 4	HCO_3^- 3	HCO_3^- 4	NO_3^- 3	NO_3^- 4	SO_4^{2-} 3
1	Thiat	35.3	35.3	304	328	7.5	7.3	37.5	52.0	125.4	86.3	0.0	0.0	0.0
2	KMD	19.0	18.7	480	452	6.4	7.5	39.5	45.8	131.2	65.1	0.2	3.1	13.8
3	SemP	5.5	5.4	840	960	6	6.8	41.3	227.9	196.7	120.2	0.1	1.0	7.1
4	KhomD	12.0	12.0	215	230	6.1	6.4	23.3	45.7	68.4	39.5	0.4	1.3	5.3
5	Diadj	28.9	28.9	260	242	6.2	6.5	18.3	30.9	78.8	74.2	7.4	11.2	1.3
6	NdFall	26.8	26.78	383	509	6.2	6.2	33.3	117.9	98.5	62.7	0.1	10.7	6.4
7	Mour	3.6	4.6	910	2320	5.0	5.9	58.7	494.4	200.5	237.9	1.3	29.5	64.3
8	Potou	6.5	6.0	978	1570	6.5	7.3	220.3	269.4	921.3	263.8	116.4	107.0	260.7
9	Kcoura	9.3	7.5	366	356	5.9	5.8	11.0	7.0	64.9	6.1	15.4	6.3	14.8
10	Bendio	10.1	10.1	315	303	5.3	6.8	44.6	28.2	137.8	15.4	0.2	0.2	37.2
11	Petio	11.8	11.8	437	405	5.4	5.6	21.5	76.5	84.6	36.9	15.6	64.9	8.0
12	Tound	33.9	35.0	254	237	5.7	5.9	24.5	53.0	76.7	25.7	0.3	0.1	10.7
13	SMBeng	35.8	35.7	233	227	5.9	9.9	12.7	35.8	48.6	27.0	0.1	0.0	3.5
14	Teure	11.8	11.8	265	247	4.1	4.1	8.8	31.5	57.4	16.4	8.9	27.7	12.5
15	NiaPe	32.3	32.2	405	200	6.75	9.1	13.3	35.6	80.1	37.7	3.9	0.0	1.3
16	WarC	32.4	35.1	717	675	6.8	7.0	18.3	75.2	125.1	67.1	7.5	31.7	1.3
17	Thiek	37.3	37.2	598	540	7.0	7.1	25.8	51.9	126.8	183.8	5.8	13.2	2.9
18	Nguer	36.9	38	218	213	5.8	6.1	10.2	31.2	46.8	41.3	0.8	2.3	9.9
19	Lomp	4.6	4.1	737	1450	6.4	7.1	38.6	240.5	189.0	317.9	6.6	42.3	28.0
20	Diourm	5.41	5.3	1	1080	5.1	5.9	44.0	163.6	323.1	123.0	2.3	0.0	129.5
21	TawaF	19.0	20.2	184	199	5.5	5.8	10.2	36.9	42.1	41.3	0.2	0.0	11.3
22	TawaM	33.4	33.4	476	260	6.9	5.6	17.7	29.8	248.3	14.0	32.1	0.0	16.6
23	KbaG	37.7	37.6	207	162	5.1	9.4	7.1	24.6	27.6	49	6.2	0.0	0.7
24	Darou	7.8	7.1	1280	1350	6.9	5.5	48.6	103.0	446.1	220.1	124.8	287.2	145.5
25	MDL	5.3	13.9	828	1160	3.8	4.9	21.8	150.1	241.3	63.3	3.9	144.3	134.1
26	Ngui	21.1	19.3	403	428	5.2	6.5	32.8	45.6	177.9	93.5	0.9	13.9	74.4
27	Fass	4.0	3.0	2090	2930	6.1	6.7	143.5	529.4	657.2	404.1	92.9	438.8	151.7
28	Mbor	2.9	2.3	1380	1540	3.6	6.8	37.0	355.2	271.4	392.9	16.8	0	63.4
29	Ndeu	8.7	8.6	599	1040	4.4	6.8	61.4	232.6	180.5	119.8	21.7	22.7	23.3
30	NdSao	4.8	4.5	1960	230	6.7	5.0	41.7	130.1	963.4	242.8	2.8	34.6	666.8
31	Ngadia	6.5	5.8	687	1950	7.9	4.1	79.4	364.7	313.8	217.4	62.1	353.6	30.2
32	Thiaye	11.5	11.5	422	497	6.1	5.7	7.1	52.1	47.2	47.0	20.2	156.1	3.1

No	ID	SO_4^{2-} 4	Na^+ 3	Na^+ 4	NH_4^+ 3	NH_4^+ 4	K^+ 3	K^+ 4	Ca^{2+} 1	Ca^{2+} 2	Mg^{2+} 3	Mg^{2+} 4	TOC 3	TOC 4
1	Thiat	0.0	14.7	17.6	0.0	0.0	2.0	1.9	17.2	27.3	4.4	5.2	0.1	0.0
2	KMD	1.9	19.6	21.0	1.3	0.0	2.2	2.6	15.8	51.8	3.0	6.9	2.6	0.3
3	SemP	23.3	48.4	129.7	0.7	0.0	2.4	6.2	8.8	27.9	4.1	10.5	2.2	3.1
4	KhomD	11.0	11.6	21.1	0.4	0.4	2.1	2.8	5.0	11.6	2.7	4.7	0.2	1.6
5	Diadj	1.4	11.3	17.5	0	0.4	1.6	2.3	8.2	16.8	3.2	4.8	0.0	0.6
6	NdFall	15.5	17.3	49.9	0.9	0.0	1.6	5.6	9.6	24.6	2.3	10.3	0.0	0.2
7	Mour	300.2	30.8	241.4	0.0	0.0	3.1	18.6	21.6	125.7	7.4	60.6	0.0	4.1
8	Potou	85.4	122.2	144.8	0.0	0.0	8.3	17.4	125.0	102.5	30.9	26.7	0.0	5.0
9	Kcoura	5.2	8.3	5.0	0.3	0.2	1.8	1.5	7.0	1.5	2.8	1.4	0.0	0.2
10	Bendio	26.6	25.1	15.5	0.5	0.3	2.7	1.7	10.2	8.7	5.4	3.5	0.0	0.2
11	Petio	2.8	13.6	38.6	2.0	0	2.7	4.5	6.3	17.4	2.6	10.1	7.0	0.2
12	Tound	2.9	15.6	28.2	3.0	0.4	2.6	2.6	4.0	6.1	0.9	2.1	7.2	1.1
13	SMBeng	1.5	8.3	23.5	0.9	0.0	1.7	2.9	4.5	5.9	0.8	0.3	1.5	2.3
14	Teure	28.4	9.1	27.4	0.6	0.0	1.8	3.5	4.4	7.8	1.2	2.9	0.0	0.6

Table 3 continued

No	ID	SO ₄ ²⁻ 4	Na ⁺ 3	Na ⁺ 4	NH ₄ ⁺ 3	NH ₄ ⁺ 4	K ⁺ 3	K ⁺ 4	Ca ²⁺ 1	Ca ²⁺ 2	Mg ²⁺ 3	Mg ²⁺ 4	TOC 3	TOC 4
15	NiaPe	5.9	6.9	23.0	0.4	0.4	1.3	2.7	13.3	6.6	2.3	2.1	0.0	0.4
16	WarC	1.5	7.06	23.5	0.0	0.0	1.2	2.9	26.0	5.9	3.1	0.3	0.0	1.2
17	Thiek	4.7	13.4	25.6	0.4	0.0	1.62	2.4	18.5	49.1	4.3	8.6	0.8	0.1
18	Nguer	15.8	7.1	19.9	0.8	0.5	1.4	2.3	5.4	12.4	0.7	2.0	0.4	1.7
19	Lomp	96.3	18.2	125.0	2.8	2.4	2.2	5.7	28.8	99.1	5.5	31.9	1.0	10.7
20	Diourm	236.3	43.2	113.3	4.5	3.9	4.2	4.6	43.2	70.3	7.1	20.4	8.4	4.4
21	TawaF	0.7	8.0	29.3	0.4	0.5	1.6	5.6	2.3	2.1	1.5	0.2	0.0	1.9
22	TawaM	44.3	27.5	25.2	1.2	0.0	9.1	2.4	32.9	4.6	7.5	5.0	0.0	0.6
23	KbaG	0.0	4.3	19.4	0.4	3.6	1.4	5.5	1.9	3.0	1.0	0.5	0.5	5.8
24	Darou	169.6	49.4	101.1	1.2	0.0	24.7	47.3	55.8	101.1	15.8	31.9	1.5	4.2
25	MDL	196.5	14.5	94.3	1.4	0.0	4.0	10.1	43.2	80.7	7.4	26.4	1.3	7.9
26	Ngui	75.7	19.8	29.5	0.0	0.0	3.2	3.8	21.8	38.1	8.8	10.9	0.2	0.7
27	Fass	305.6	88.7	316.5	0.0	0.0	8.7	44.4	94.5	235.9	16.6	66.6	4.7	25.2
28	Mbor	272.2	33.7	257.4	3.9	0.0	9.2	52.4	31.7	98.2	4.6	31.4	10.9	12.2
29	Ndeu	73.0	32.3	130.1	0	0.0	3.4	9.7	18.5	48.1	4.2	13.5	0.0	2.6
30	NdSao	1.1	28.8	93.4	2.7	3.4	9.6	20.0	196.9	277.9	43.0	119.4	0.0	4.3
31	Ngadia	144.3	50.6	165.1	1.4	0.0	4.5	9.9	33.3	142.7	9.5	70.1	4.1	3.1
32	Thiaye	9.3	4.2	29.3	0.9	0.0	4.9	25.8	5.057	35.2	1.4	9.5	0.0	0.5

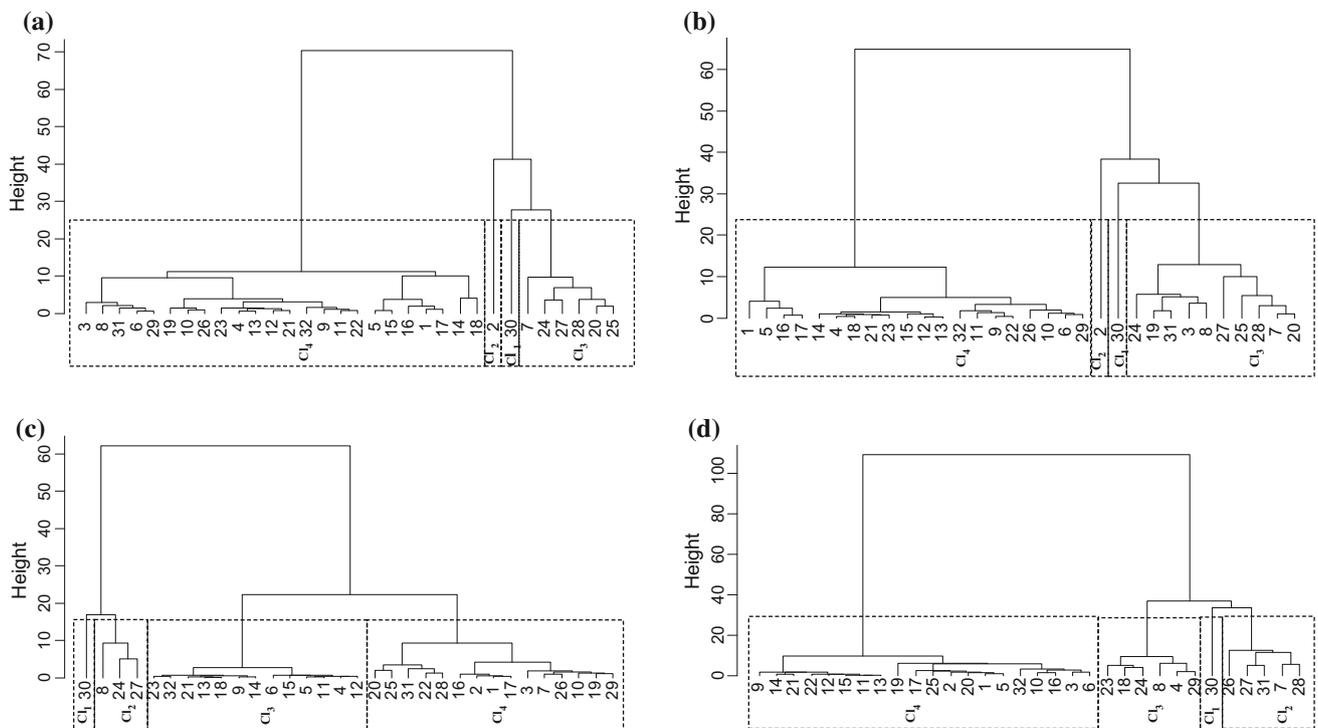


Fig. 3 Dendrogram by HCA for campaigns 1 (a), 2 (b), 3 (c) and 4 (d)

gradient, ion exchange reactions gradually change the low mineralized groundwater from Na–HCO₃ and Ca–HCO₃ types in the central zone to Na–Cl facies towards West.

This process is accompanied by evaporation and sea spray derived chloride which tends to increase chloride contents in the part in addition to that produced from pollution.

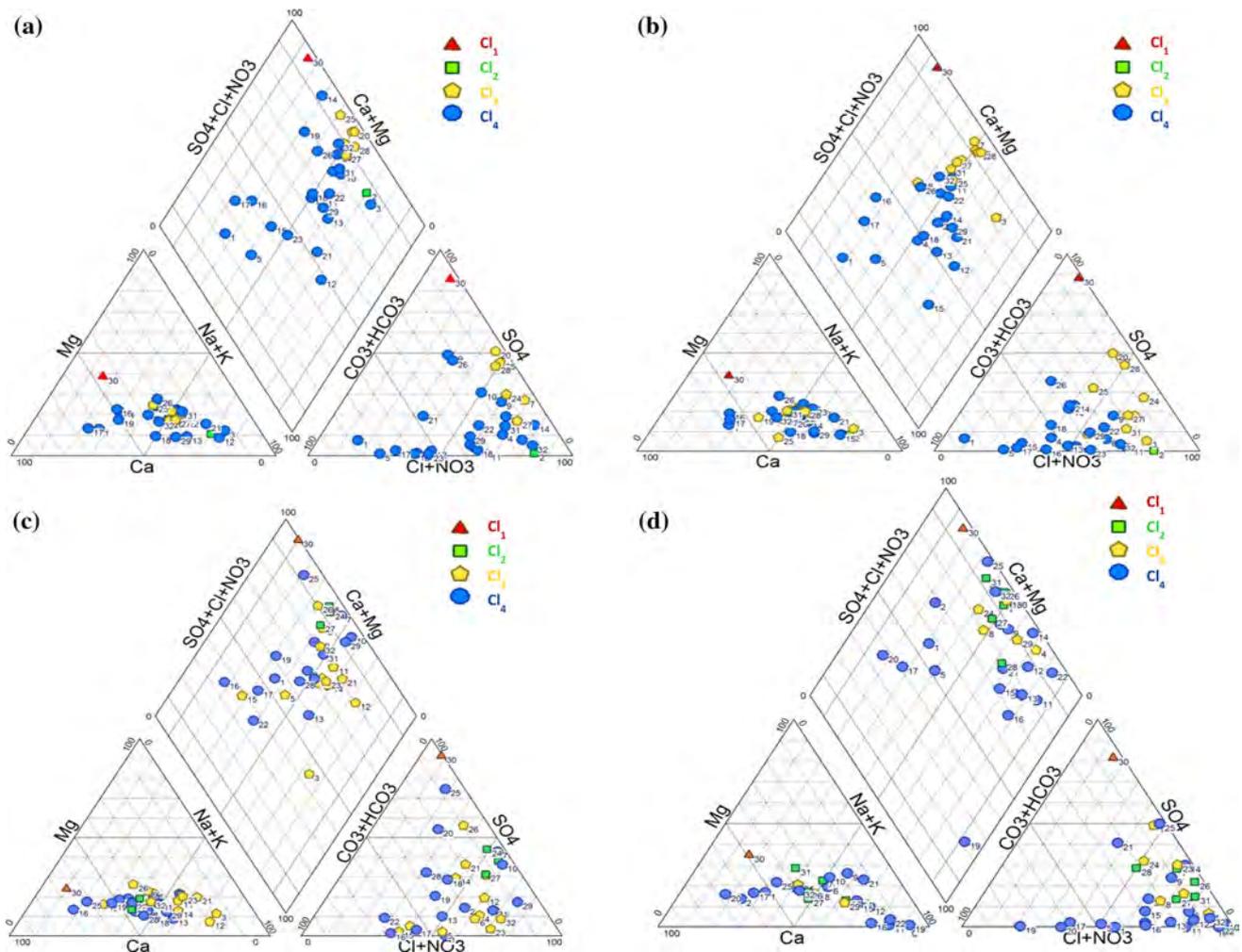


Fig. 4 Piper plot of chemical data for campaigns 1 (a), 2 (b), 3 (c) and 4 (d)

Anthropogenic sources and processes

As stated above, various sources related to socio-economic activities in the region impacted the groundwater resource. Figure 8 shows nitrate and sulfate distribution as well as seasonal variation in relation to recharge process. With regard to sulfate, higher concentrations occur mostly in the south western part of the aquifer; they are accompanied with lowest acidic pH values. Sulfate and nitrate concentrations and pH values, which are maintained for the four campaigns, can be explained by input from the Phosphate mining industry (producing phosphoric and sulfuric acids), uses of fertilizers and pesticides in the agricultural Niayes zones, organic matter degradation and to a lesser extent from dissolution of gypsum mineral in this shallow groundwater environment (Singh et al. 1995; Hadas et al. 1999; Helena et al. 2000; Güler et al. 2012).

The NO_3^- contents distribution varies seasonally and occurrence of high concentrations during dry season expands to the east where water table is relatively deep and

many groundwater samples exceed drinking permissible limit of 50 mg/l. Measured values of campaign 3 are lower, suggesting dilution from infiltrating water as previously shown with water types and water chemistry variations. The high nitrate levels are particularly noted in the agricultural Niayes zones; these can be related to uses of fertilizers, infiltration of irrigation water and also organic matter degradation. Occurrence of ammonium at wells 2 and 1 in dry periods suggests anoxic conditions where organic matter degradation evolves toward production of NH_4^+ (9.1 and 11.3 mg/l) and high values of total organic carbon (10.7 and 7.7 mg/l).

Environmental isotopes

Isotopic composition of rainwater

Rainwater sampled at three stations (Mboro, Kebemer, Potou) during the period July to October 2012 were analyzed using bulk biweekly interval basis samples where

Fig. 5 **a** Distribution of variables (a–a') and samples (b–b') by PCA for campaigns 1 and 2. **b** Distribution of variables (c–c') and samples (d–d') by PCA for campaigns 3 and 4

events smaller than 5 mm were discarded. Measured values of stable isotopes of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ are variable, from -7.8 to -1.7 ‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and from -56 to -8.3 ‰ for $\delta^2\text{H}$ with averages of -5.2 and -34 ‰, respectively. Depleted values occur in August which corresponds to the maximum

rainfall events. The Local Meteoric Water Line (LMWL) equals $\delta^2\text{H} = 7.7 \times \delta^{18}\text{O} + 5.9$; $R^2 = 0.97$ which is close to that defined by Travi et al. (1987) and the GMWL by Craig (1961). This is an indication that rainwater in Senegal is not evaporated during precipitation due to short and heavy event storms occurring.

Tritium contents were also analyzed for the same set of samples; values vary between 1.4 and 4.6 TU with a mean of 2.7 TU. This range values and mean were also found at Thies town (Madioune et al. 2014) and Dakar (Diedhiou

Fig. 6 **a** Spatial distribution of groundwater chemical classes for campaigns 1, 2, 3 and 4. **b** Water types spatial distribution for campaigns 1, 2, 3 and 4

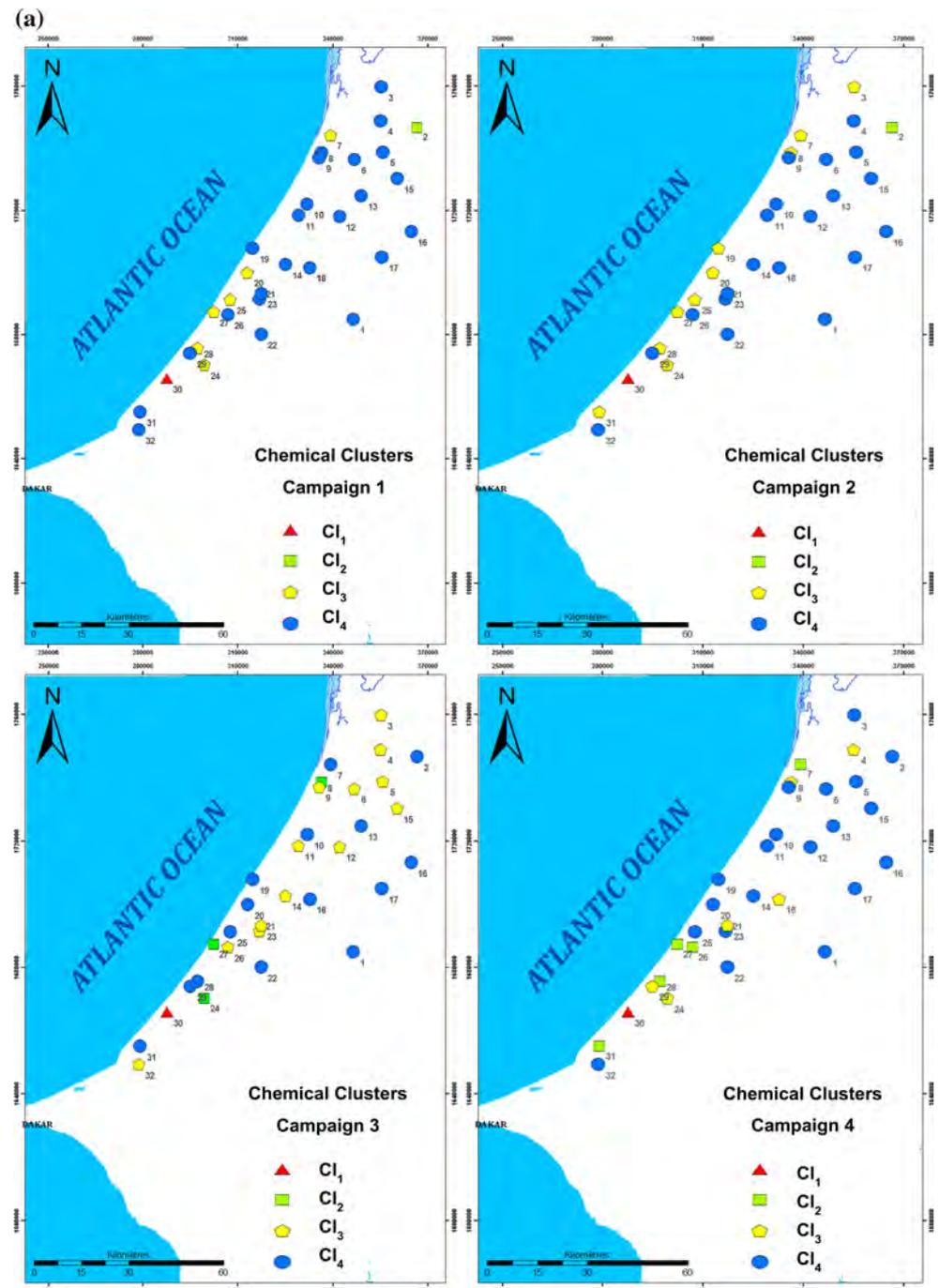
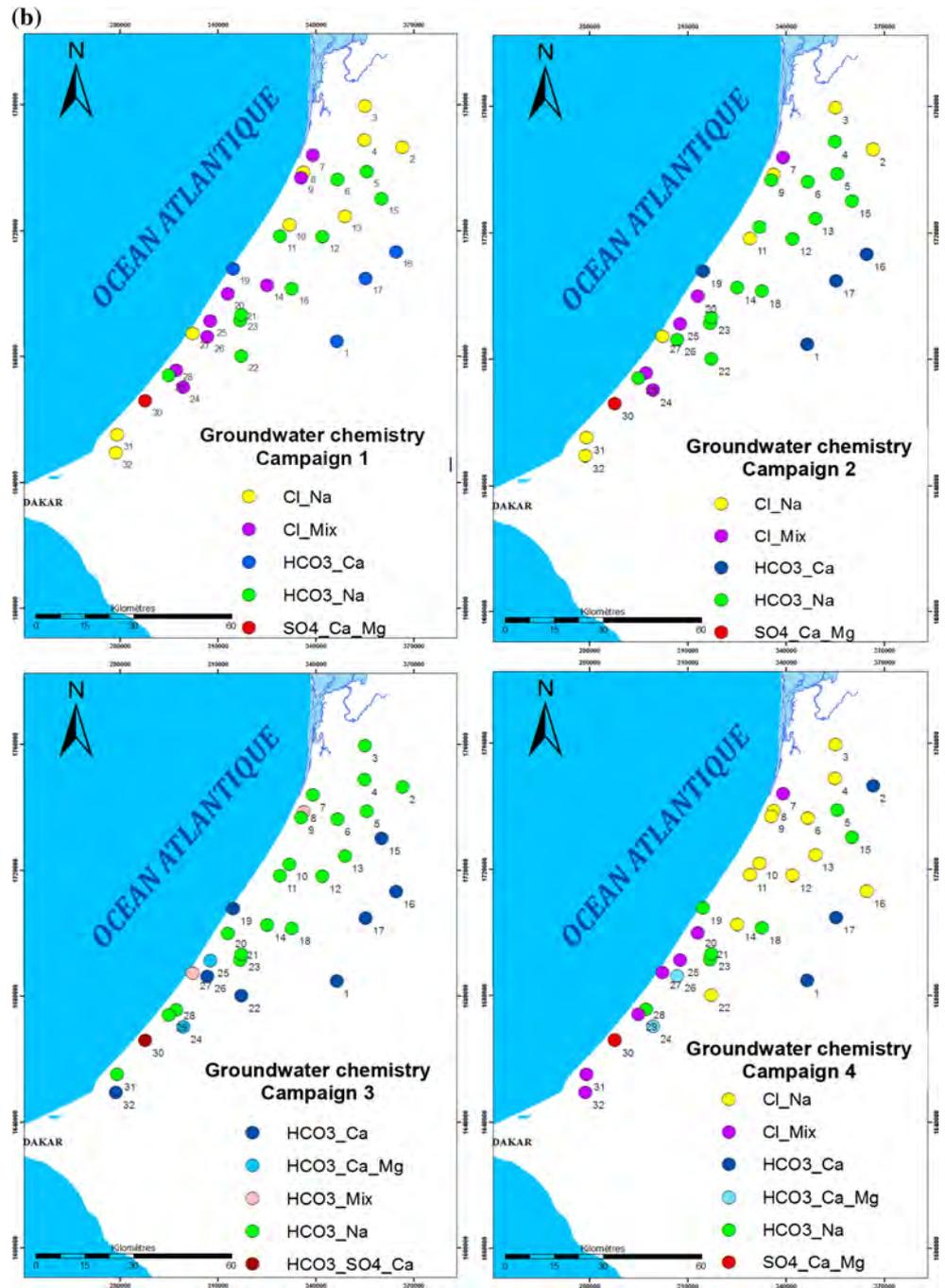


Fig. 6 continued



2011) and they fit with Leduc et al. (1996) approximation based on present day Niger precipitations which lead to values between 2 and 4 TU.

Isotopic composition of groundwater

The isotopic composition of groundwater in the study area was investigated during the 2012 campaigns corresponding to dry season and end of rainy season. The campaign 3 (February),

data set ranges from -5.5 to -3.1 ‰ and from -37 to -17 ‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$ with averages of -4.5 ‰ and -31 ‰, respectively. In campaign 4 values of $\delta^{18}\text{O}$ range from -5.5 to -3.5 ‰ with an average of -4.8 ‰ and values of $\delta^2\text{H}$ from -37 to -26 ‰ with an average of -33 ‰.

Plotted in the conventional $\delta^{18}\text{O}$ vs $\delta^2\text{H}$ graph, the data cluster below the LMWL reflecting an evaporation enrichment of heavy isotopes giving the following linear regression (Fig. 9a)

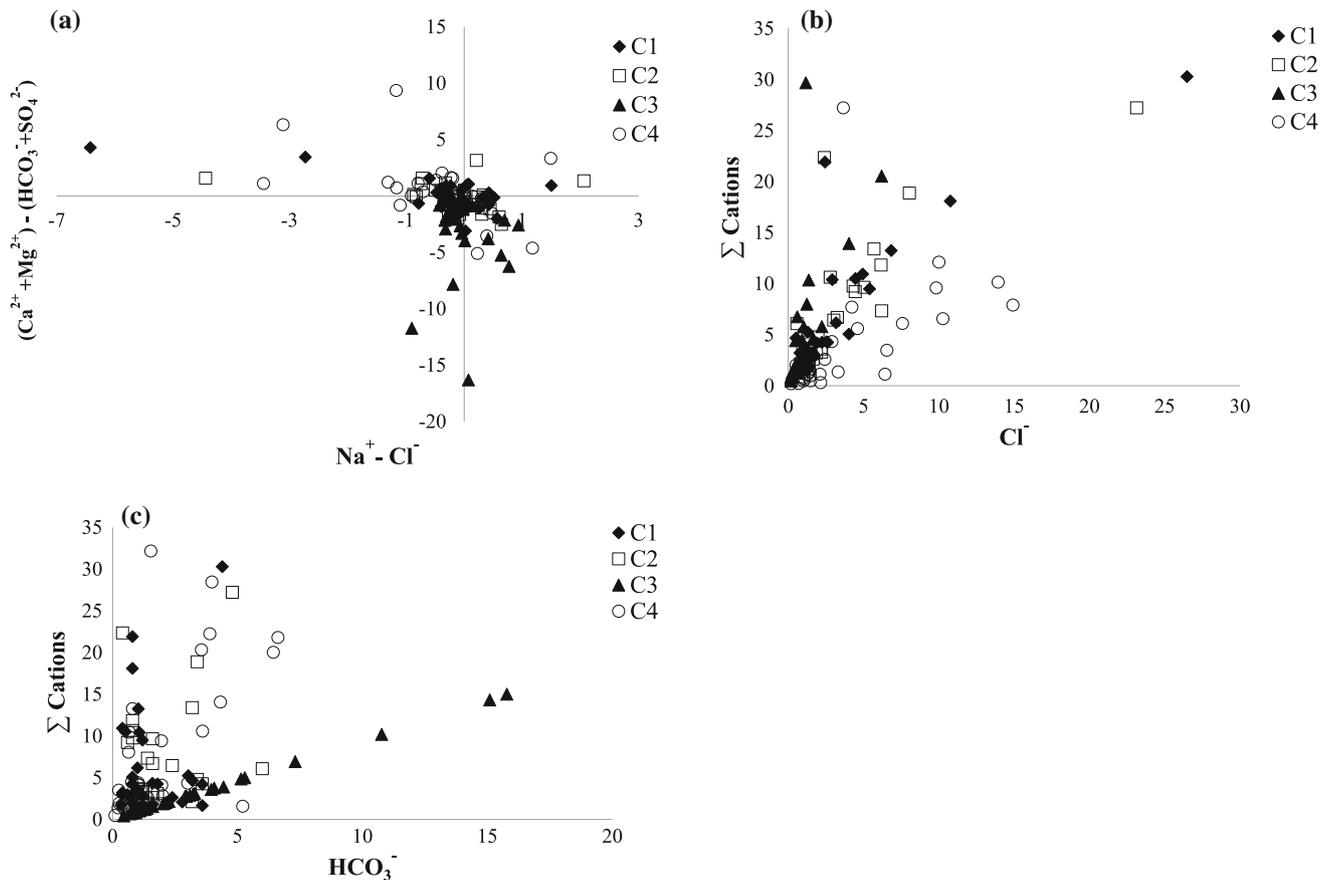


Fig. 7 a, b, c Seasonal evolution of chemical elements by binar diagram (in meq/l)

$$\delta^2\text{H} = 5.3 \delta^{18}\text{O} - 7.6 \quad (\text{Oct}, R^2 = 0.96)$$

$$\delta^2\text{H} = 4.3 \delta^{18}\text{O} - 11.7 \quad (\text{Feb}, R^2 = 0.98)$$

The trends observed indicate evaporation processes derived from fractionation both on ground surface and during infiltration through the unsaturated zone. Anthropogenic contribution evidenced by NO_3^- contents in wells may also enrich the isotopic composition of the groundwater.

The ^3H contents range from ≤ 0.7 to 4.2 TU. Wells (Fig. 9b), with lowest values (≤ 0.7 TU) are mostly located in the northern central part of the aquifer and suggest groundwater residence time of more than 50 years of age during the bomb test era. In fact, Detectable tritium concentrations in groundwater evidence recharge has occurred after nuclear bomb test (1952–1953) or mixing had occurred between recent tritiated water and water recharges prior to 1952.

This observation is confirmed by results of Gaye and Edmunds (1996) who recorded the thermonuclear precipitation peak of ^3H in the unsaturated zone of Louga zone at depths between 12 and 20 m during sampling in

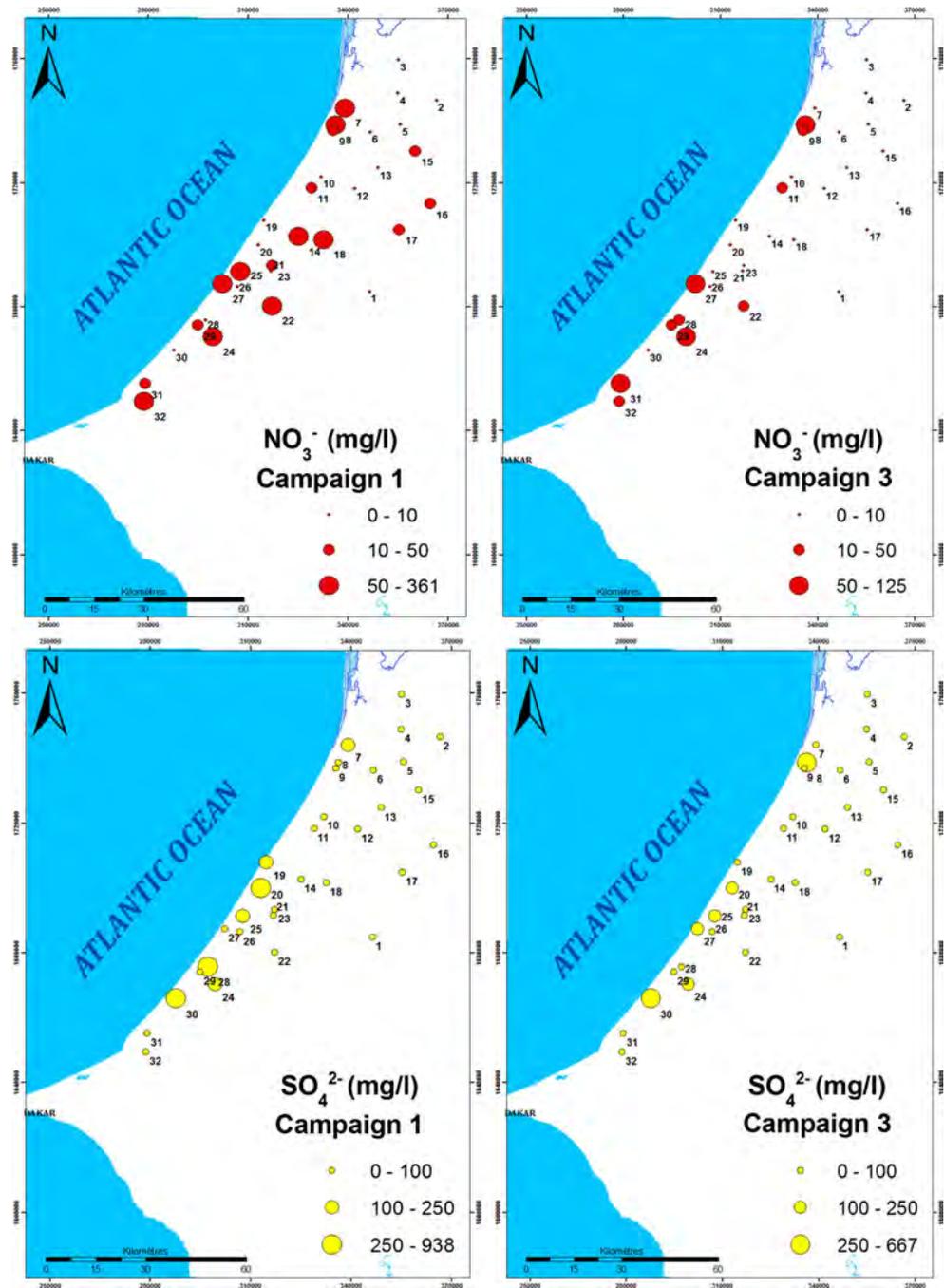
1989–1990; thus the water in these depths already had ages of >30 years. The authors assume that recharge occurs through piston-flow whereas, detectable ^3H contents in groundwater which are very similar to the rainwater values evidence present recharge. Variability in the measured contents may be derived from active circulation of groundwater and/or dispersion and mixing which will generally attenuate its content since ^3H apart from decay is a conservative tracer and changes due to evaporation are relative small compared to measurement errors.

Changes in ^3H contents may also be due to variability in recharge rates which depends on combination of factors like difference in geology, climate, soil types and depth to water table.

Conclusion

The HCA and PCA performed with the major ions and environmental isotope data were applied to provide insight into the spatial and temporal chemical patterns and their geochemical processes in the Senegal North littoral aquifer.

Fig. 8 Spatial distribution of NO_3^- and SO_4^{2-} for campaigns 1 and 3



Clusters computed using these statistical methods marked water types are Ca-SO_4 , mixed- Cl/SO_4 , Na-Cl , mixed- Cl , mixed- HCO_3 . In the narrow coastal strip zone, the groundwater is characterized by high EC, SO_4^{2-} . Combination of both HCA and PCA approaches allowed classification of groundwater chemical types. These are likely due to both natural and anthropogenic effects which explain their spatial and seasonal variability (Fig. 6) (Tables 2, 3). Contents and low pH probably resulting from

saline intrusion, gypsum dissolution together with anthropogenic SO_4^{2-} from industry and agriculture. In the central and eastern part of the aquifer, groundwater is less mineralized and water types evolve spatially from Ca-HCO_3 , to mixed- Cl . The trend seems to be controlled by ion exchange reactions where Na^+ and Cl^- progressively replace Ca^{2+} and HCO_3^- as flow proceeds downgradient. The Ca-HCO_3 type occurs mainly in the limestone part of the system. The environmental isotope measurements

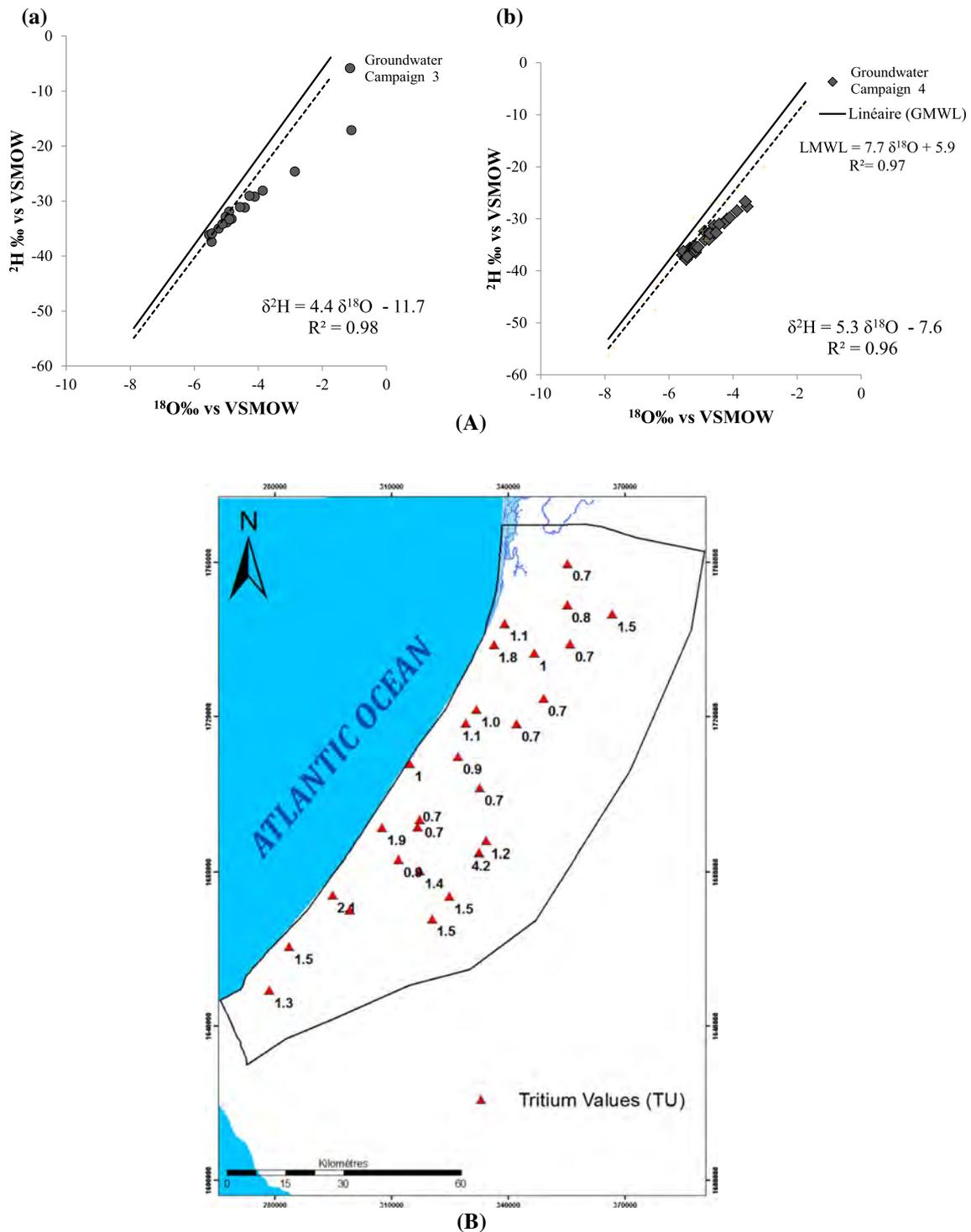


Fig. 9 a Environmental stable isotopes variability ^{18}O vs ^2H in campaigns 3 (a) and 4 (b). b Tritium values distribution for campaign 4

($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, ^3H) which exhibit evaporation signature indicate slow and various infiltration rates.

Future work in this system could focus mainly in the “Niayes” ecosystem where acidic pH values as well as

impact of agriculture practices occur. Also, a key issue is recharge processes through the unsaturated zone to the water table which will allow better groundwater management.

Acknowledgments The authors thank the High Education Ministry of Senegal and French Cooperation for funding this research. They also thank UMR 6143 M2C laboratory of Rouen University, Department of Geology of Cheikh Anta Diop University in Dakar.

References

- Adams S, Titus R, Pietersen K, Tredoux G, Harris C (2001) Hydrochemical characteristics of aquifers near Sutherland in the western Karoo South Africa. *Hydrol J* 241(1–2):91–103
- Alberto WD, Del Pilar DM, Valeria AM, Fabiana PS, Cecilia HA, De los Angeles BM (2001) Pattern recognition techniques for evaluation of spatial and temporal variations in water quality, a case study: Suquia river basin (Cordoba–Argentina). *Water Resour* 35:2881–2894
- Alther GA (1979) A simplified statistical sequence applied to routine water quality analysis: a case history. *Ground Water* 17:556–561
- Ashley RP, Lloyd JW (1978) An example of the use of factor analysis and cluster analysis in groundwater chemistry interpretation. *J Hydrol* 39(3–4):335–364
- Birke M, Rauch U (1993) Environmental aspects of the regional geochemical survey in the southern part of east Germany. *J Geochem Explor* 49(1–2):35–61
- Brown CE (1998) Applied multivariate statistics in geohydrology and related sciences. Springer, Berlin, p 248
- Chkir N, Trabelsi R, Bahir M, Hadj Ammar F, Zouari K, Chamchati H, Monteiro JP (2008) Vulnérabilité des ressources en eaux des aquifères côtiers en zones semi-arides—Etude comparative entre les bassins d’Essaouira (Maroc) et de la Jeffara (Tunisie). *Commun Geol* 95:107–121
- Cissé I, Fall ST, Badiane M, Diop Y, Diouf A (2006) Horticulture et usage des pesticides dans la zone des Niayes, ISRA/LNERV, EISMV, LACT/Faculté de Médecine Pharmacie/UCAD, document de travail Ecocité 8 p 14
- GKW Consult (2009) Projet Eau à Long Terme—Etudes Hydrogéologiques Complémentaires. Rapport Final Dakar et Littoral Nord p 58 (+ Annexes)
- Coplen TB (1988) Normalization of oxygen and hydrogen isotope data. *Chem Geol Isot Geosci Sect* 72:293–297
- Craig H (1961) Isotope variations in meteoric water. *Science* 133:1702–1703
- Demlie M, Wöhnlich S, Gizaw B, Stichler W (2007) Groundwater recharge in the Akaki catchment, central Ethiopia: evidence from environmental isotopes ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ and ^3H) and chloride mass balance. *Hydrol Process* 21:807–818
- Diedhiou M (2011) Approche multitraceur géochimique et isotopique à l’identification des sources de la pollution nitrée et des processus de nitrification et dénitrification dans la nappe de Thiaroye. Thèse de doctorat unique, Univ, Cheikh Anta Diop de Dakar, Dakar **210**
- Dragon K, Gorski J (2015) Identification of groundwater chemistry origins in a regional aquifer system (Wielkopolska region, Poland) *Environ. Earth Sci* 73:2153–2167
- Edmunds WM, Gaye CB (1994) Estimating the spatial variability of the groundwater recharge in the Sahel using chloride. *J Hydrol* 156:47–59
- Faye S (1995) Modélisation hydrodynamique de la nappe du Littoral Nord entre Cayar et Saint louis, Impact des futurs prélèvements sur l’approvisionnement de Dakar et ses environs Louis PH D, Département Géologie, Univ. C. A. Diop, p 101 (+ annexes)
- Faye S, Gaye CB, Faye A, Malou R (1992) Solute profile in unsaturated Quaternary sands from Senegal: environmental information and water-rock interaction. *Water–Rock Interaction, Kharaka & Maest.* 1–5
- Faye S, Gaye CB, Faye A, Malou R (1997) Impact of additional exploitation on the Littoral aquifers in the North of Senegal. XXVII IAH Congress, Nottingham. Groundwater in the Urban Environment Problems, Processes and Management, Balkema–Rotterdam 1–5
- Gaye CB (1990) Etude isotopique et géochimique du mode de recharge par les pluies et de décharge évaporatoire des aquifères libres sous climat semi-aride au nord du Sénégal. PH D, Département Géologie, Univ. C. A. Diop, p 280 (+ annexes)
- Gaye CB, Edmunds WM (1996) Groundwater recharge estimation using chloride, stable isotopes and tritium profiles in the sands of northwestern Senegal. *Environ. Geology* 27:246–251
- Giambastiani BMS, Colombani N, Mastrocicco M, Fidelibus MD (2013) Characterization of the lowland coastal aquifer of Comacchio (Ferrara, Italy): hydrology, hydrochemistry and evolution of the system. *J Hydrol* 501:35–44
- Güler C, Thyne GD, McCray JE, Turner AK (2002) Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeol J* 10:455–474
- Güler C, Kurt MA, Alpaslan M, Akbulut C (2012) Assessment of the impact of anthropogenic activities on the groundwater hydrology and chemistry in Tarsus coastal plain (Mersin, SE Turkey) using fuzzy clustering, multivariate statistics and GIS techniques. *J Hydrol* 414–415:435–451
- Hadas A, Sagiv B, Haruyv N (1999) Agricultural practices, soil fertility management modes and resultant nitrogen leaching rates under semi-arid conditions. *Agric Water Manag* 42:81–95
- Helena B, Pardo R, Vega M, Barrado E, Fernandez JM, Fernandez L (2000) Temporal evolution of ground water composition in an alluvial aquifer (Pisuerga River, Spain) by principal component analysis. *Water Resour* 34:807–816
- IDEV-ic ex SENEGROSOL/COWI (2011) Etude du projet de mise en œuvre du plan d’Action de Gestion Intégrée des Ressources en eau (2^{ème} Partie) Bilan diagnostic des Ressources en eau. Rapport Technique p 21
- Kane CH (1995) Contribution à l’étude hydrochimique de la nappe des sables quaternaires du Littoral Nord au Sénégal entre Kayar et Saint Louis Thèse de doctorat 3^{ème} cycle, Département de Géologie, Université C. A. Diop, p 162 (+ annexes)
- Laaksoharju M, Skaërman C, Skaërman E (1999) Multivariate mixing and mass balance (M3) calculations, a new tool for decoding hydrogeochemical information. *Appl Geochem* 14:861–871
- Leduc C, Tgupin J, Le Gal La Salle C. (1996) Estimation de la recharge de la nappe phréatique du Continental Terminal (Niamey, Niger) à partir des teneurs en tritium. *Géosciences de surface/(Hydrogéologie–Hydrogéologie) C.R. Acad. Sci. Paris, 323, série II a, p 599 à 605*
- Madioune DH, Faye S, Orban P, Brouyère S, Dassargues A, Mudry J, Stumpp C, Maloszewski P (2014) Application of isotopic tracers as a tool for understanding hydrodynamic behavior of the highly exploited Diass aquifer system (Senegal). *J Hydrol* 511:443–459
- Noel Y (1978) Etude hydrogéologique des calcaires lutétiens entre Bambey et Louga (2^{ème} phase) Rapport BRGM 78 Dak 02, p 82
- Reeve AS, Siegel DI, Glaser PH (1996) Geochemical controls on peatland pore water from the Hudson bay lowland: a multivariate statistical approach. *Hydrol J* 181(1–4):285–304
- Singh B, Singh Y, Sekhon GS (1995) Fertilizer-N use efficiency and nitrate pollution of groundwater in developing countries. *J Contam Hydrol* 20:167–184
- Swanson SK, Bahr JM, Schwar MT, Potter KW (2001) Two-way cluster analysis of geochemical data to constrain spring source waters. *Chem Geol* 179:73–91
- Thatcher L, Janzer VJ, Edwards RW (1977) Methods for determination of radioactive substances in water and fluvial sediments. In: *Techniques of Water Resources Investigations of the US*

- Geological Survey. US Government Printing Office, Washington, DC Books 5 pp 79–81 (Chapter A5)
- Travi Y, Gac JY, Fontes JC, Fritz B (1987) Reconnaissance chimique et isotopique des eaux de pluie au Sénégal. *Géodynamique* 2:43–53
- Zghibi A, Tarhouni J, Zouhri L (2013) Assessment of seawater intrusion and nitrate contamination on the groundwater quality in the Korba coastal plain of Cap-Bon (North-east of Tunisia). *J Afr Earth Sci* 87:1–12

Annexe VI : Sédimentologie et Minéralogie

TABLEAU VI-8 : Calcul des Indices granulométriques dans le centre des dépressions par tranche de sol de 25 cm de Mboro (MB) de 0 à 25 cm, Lompoul (LO) de 0 à 100 cm et Potou (PO) de 0 à 75 cm de profondeur

Echantillon:	N-MB 0-25cm	N-MB 25-50 cm	N-MB 50-75 cm	N-MB 75-100 cm	N-MB 100-125 cm	Moyenne
Mean:	97,0	22,1	157,1	159,8	157,5	118,7
Median:	163,3	19,7	205,7	190,3	171,5	150,1
Mode:	245,2	19,8	751,1	245,2	824,5	417,2
S.D.:	5,8	3,5	5,4	4,4	4,8	4,8
Variance:	33,8	12,2	28,7	19,8	23,0	23,5
Skewness:	-0,4	0,3	-0,4	-0,4	-0,3	-0,2
Kurtosis:	-0,9	-0,6	-0,9	-0,6	-0,9	-0,8

Echantillon:	N-KH 0-25 cm	N-KH 25-50 cm	N-KH 50-75 cm	N KH 75_100	Moyenne
Mean:	88,57	147,4	234,1	231,2	175,3
Median:	101,5	186	295,9	284,9	217,1
Mode:	245,2	824,5	751,1	751,1	643,0
S.D.:	5,588	5,003	4,327	4,113	4,8
Variance:	31,22	25,03	18,72	16,92	23,0
Skewness:	-0,292	-0,495	-0,802	-0,76	-0,6
Kurtosis:	-0,861	-0,619	0,0602	0,0403	-0,3

Echantillon:	N-PO 0-25cm	N-PO 25-50 cm	N-PO 50-75cm	Moyenne
Mean:	69,96	151,2	169,6	130,3
Median:	83,88	214,2	203,7	167,3
Mode:	684,2	1584	223,4	830,5
S.D.:	6,431	6,553	4,149	5,7
Variance:	41,36	42,94	17,21	33,8
Skewness:	-0,192	-0,587	-1,013	-0,6
Kurtosis:	-1,169	-0,657	1,154	-0,2

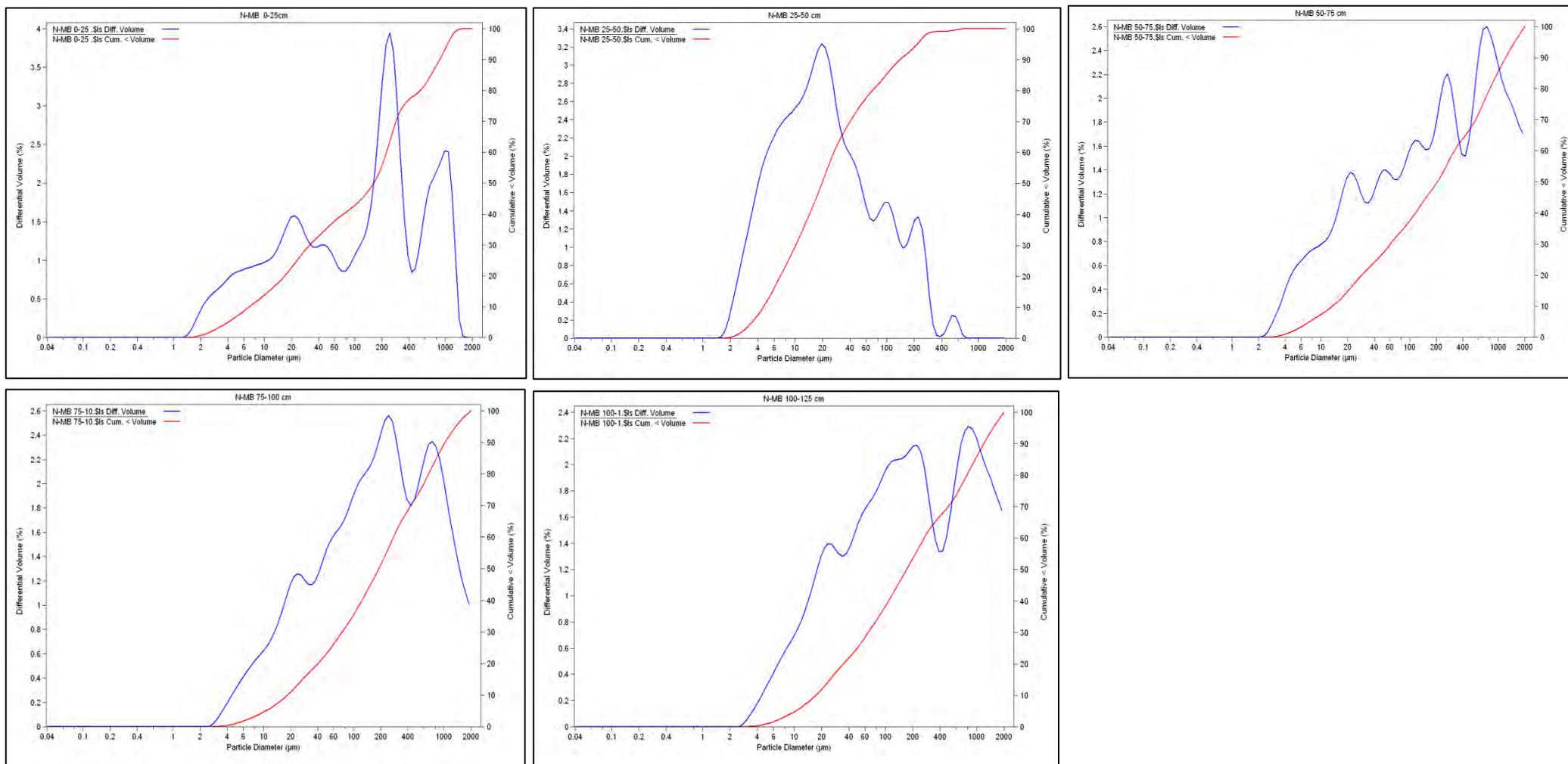


FIGURE VI-2: Courbes granulométriques et allures modales du profil de Zone Non Saturée de la station centre de Mboro par tranche de sol de 25 cm de Mboro de 0 à 125 cm de profondeur

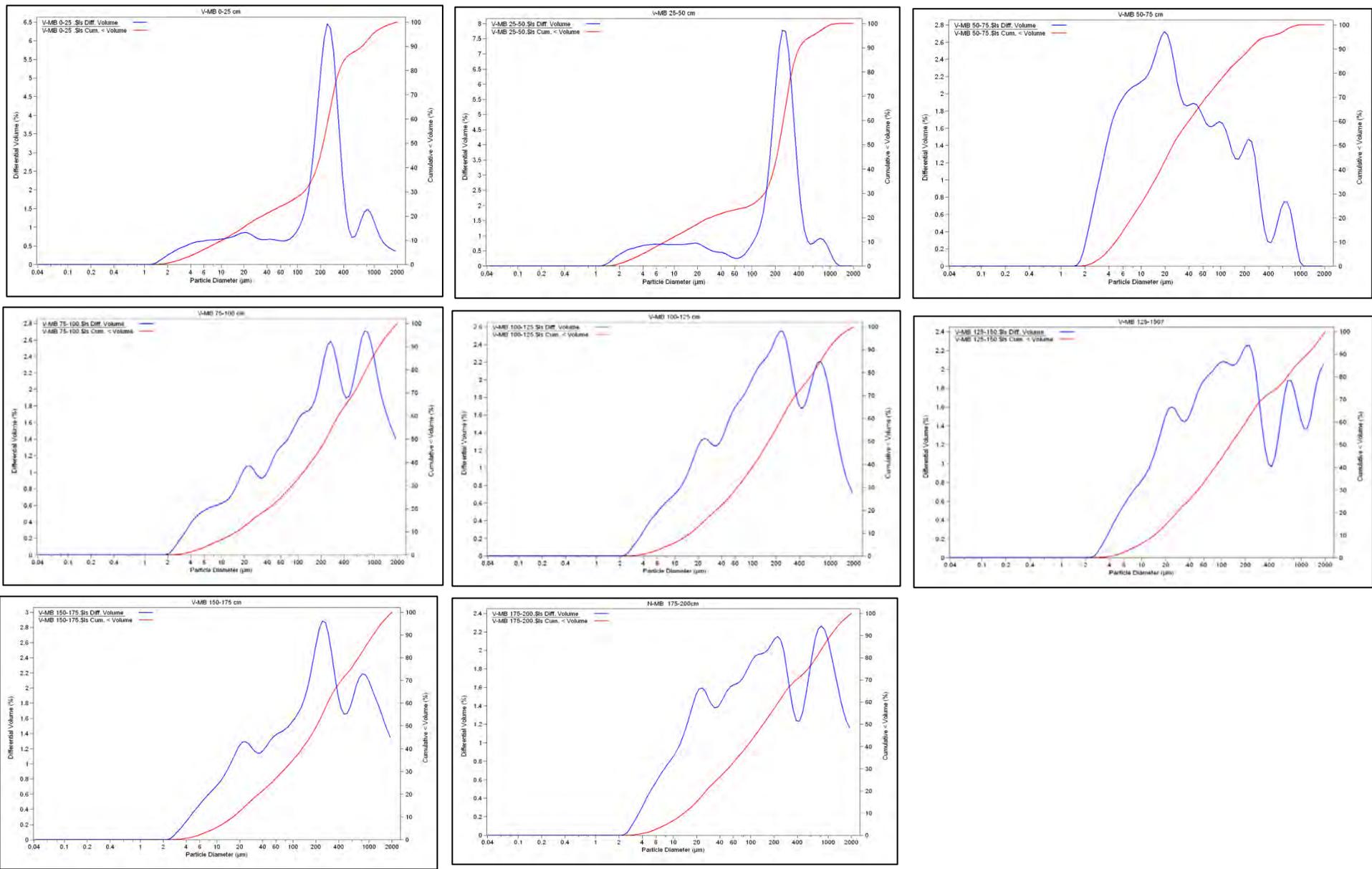


FIGURE VI-3 : Courbes granulométriques et allures modales du profil Zone Non Saturée de la station versant Mboro par tranche de sol de 25 cm de 0 à 200 cm de profondeur

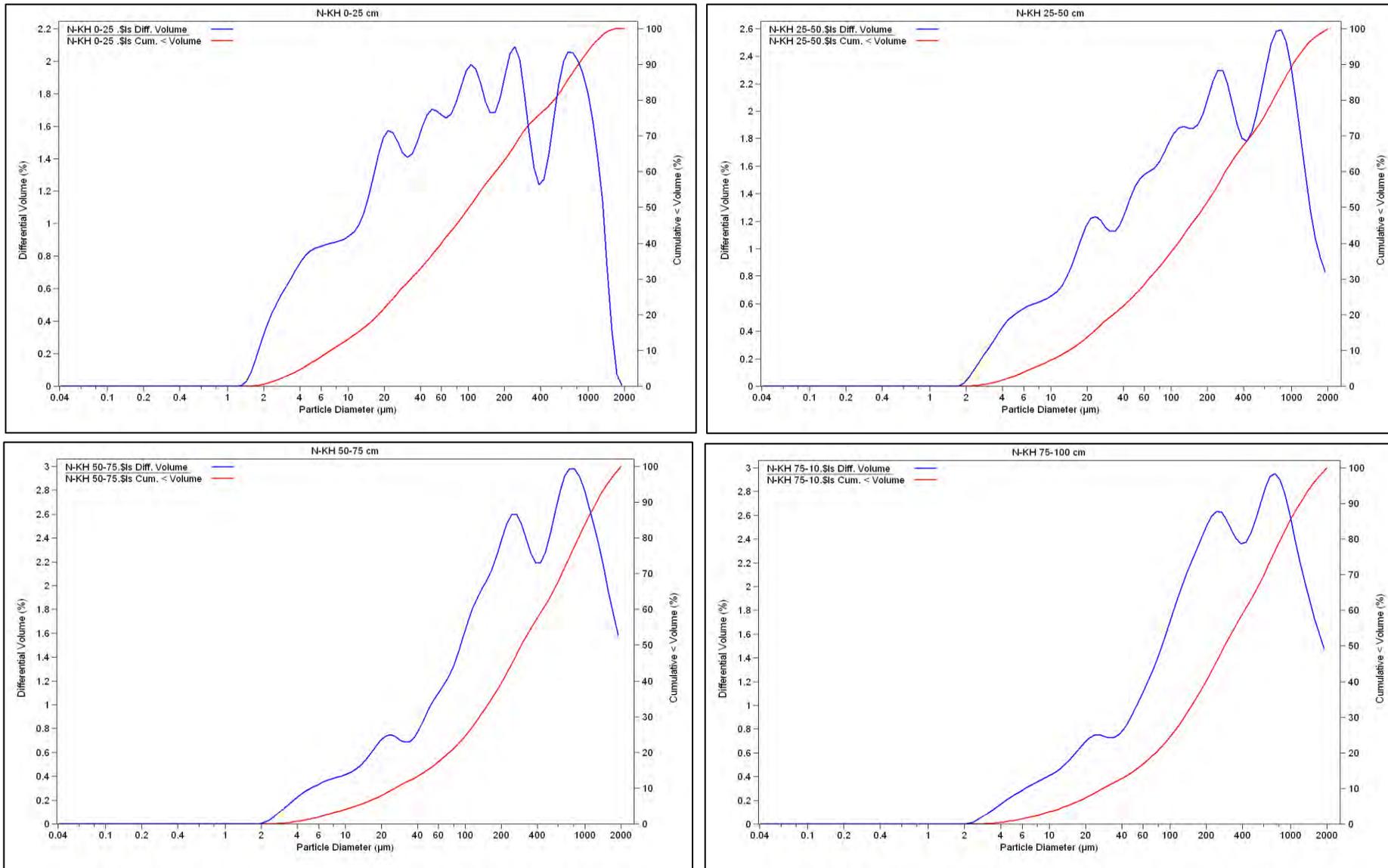


FIGURE VI-4 : Courbes granulométriques et allures modales du profil Zone Non Saturée de la station centre de Lompoul par tranche de sol de 25 cm de 0 à 100 cm de profondeur

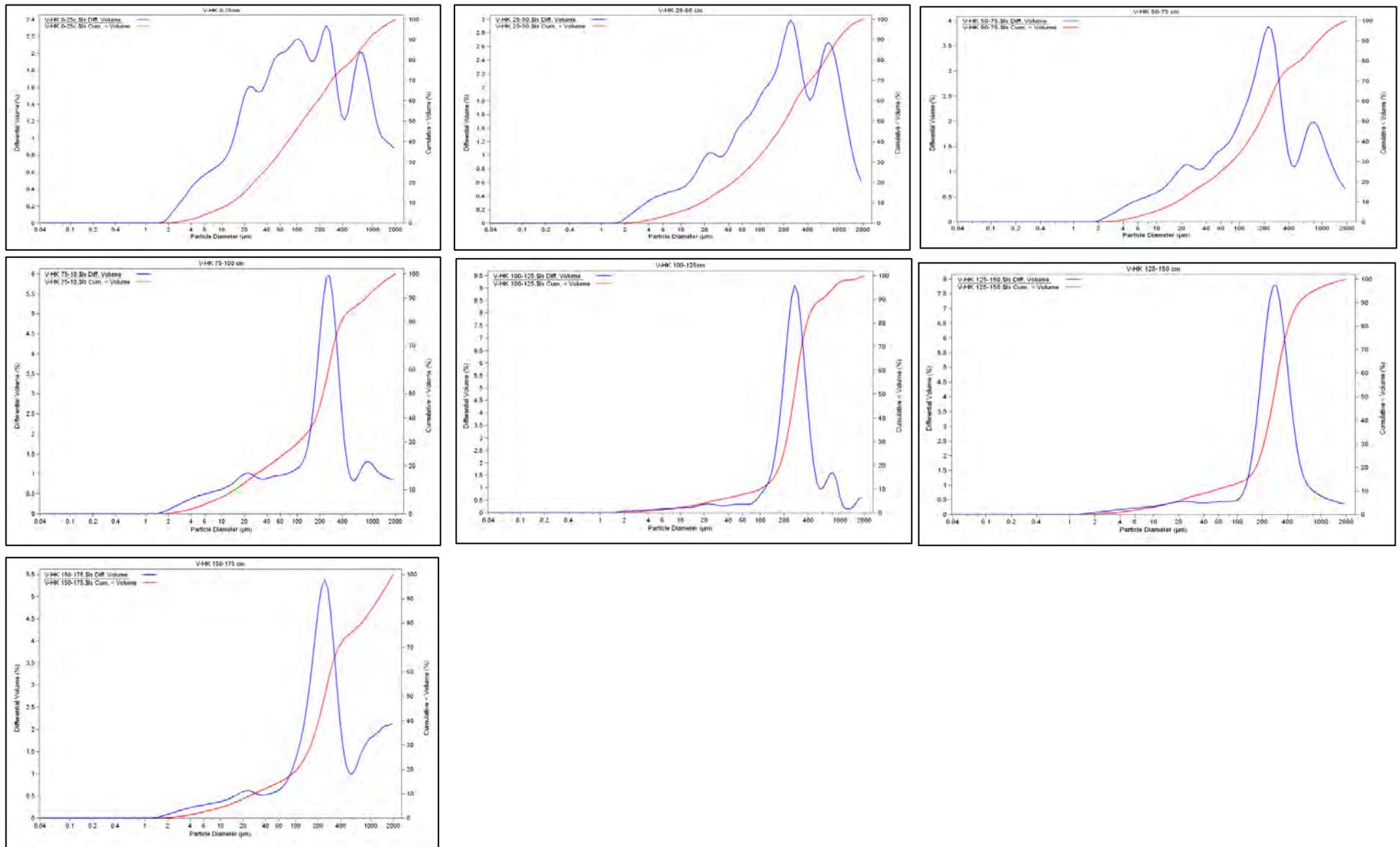


FIGURE VI-5 : Courbes granulométriques et allures modales du profil Zone Non saturée de Profil Potou Versant (2) par tranche de sol de 25 cm de 175 à 450 cm de profondeur

Annexe VII : Minéraux Argileux

TABLEAU VII-9 : Cortège des minéraux argileux dans les Niayes de Mboro, Lompoul et Potou

Niaye Prof / Position	Mboro		Lompoul		Potou	
	Centre	Versant	Centre	Versant	Centre	Versant
0-25 cm	K, I, Int V-Sm	K, (I?, C ?)	K	K	K	K, I
25_50 cm	K, I, Int C-V	K, I, Int C-V	K, (I?)	K	K, I, C	K
50_75 cm	K, I	K, I	K, I	K	K, I	K
75-100 cm	K	K, (I?)	K, (I?)	K, (I?)		K
100-125 cm		K	K			K
125-150 cm		K	K			"
150- 175 cm		K	K, (I?)			"
175 - 200 cm		K				K, I
250-275 cm						K
300-325 cm						K, (I?)
350-375 cm						K, I, (C?)
400-450 cm						K, I

NB: ? signifie suspicion de minéral

Annexe VIII : Chimie des eaux interstitielles

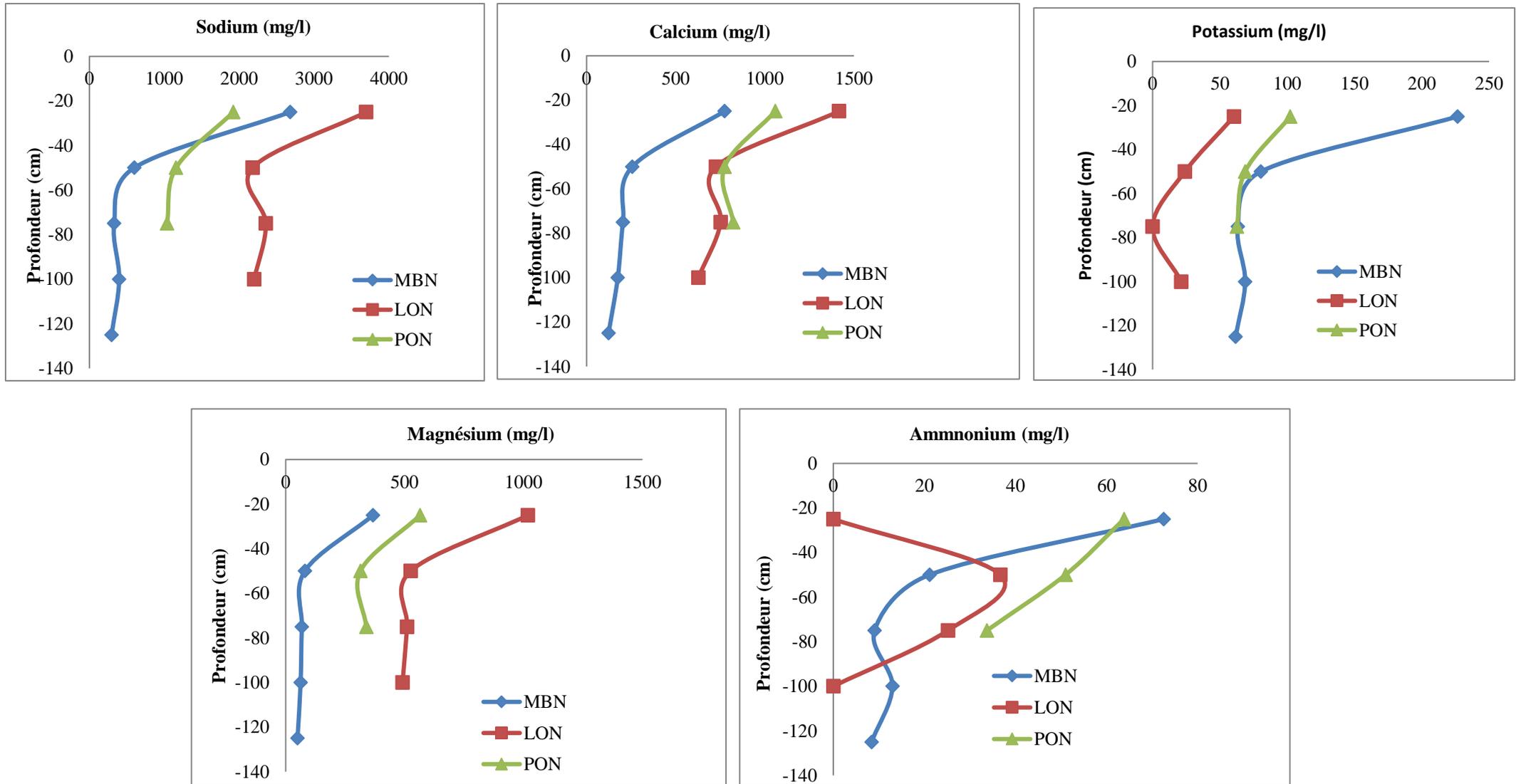


FIGURE VIII-6 : Distribution des ions Na, Ca, K, Mg, NH₄ le long de la ZNS dans les eaux interstitielles dans les stations centres des Niayes Mboro, Lompoul et Potou en Juin 2011

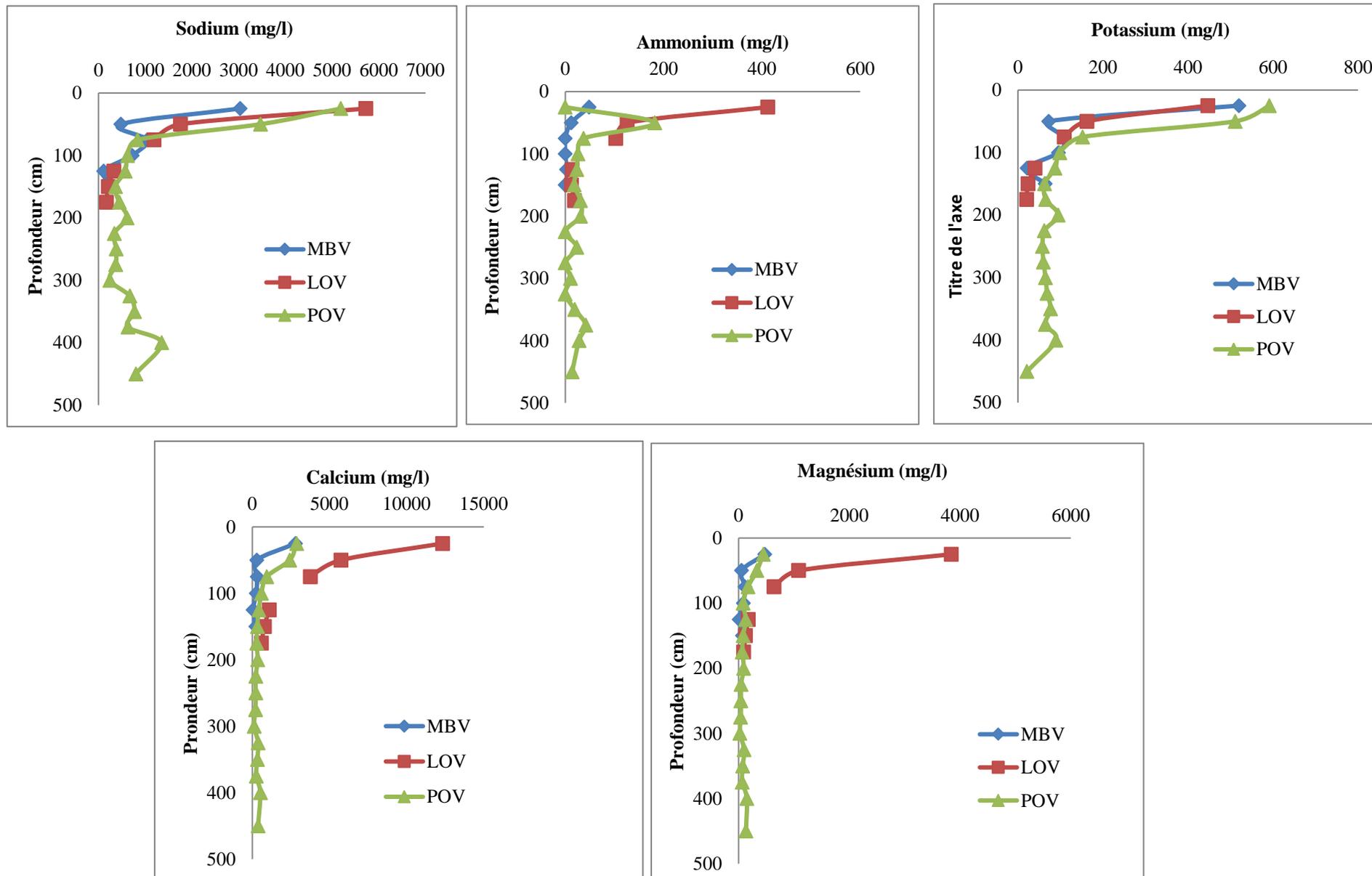


FIGURE VIII-7 : Distribution des ions Na, Ca, K, Mg, NH₄ le long de la ZNS dans les eaux interstitielles dans les stations versants des Niayes Mboro, Lompoul et Potou en Juin 2011

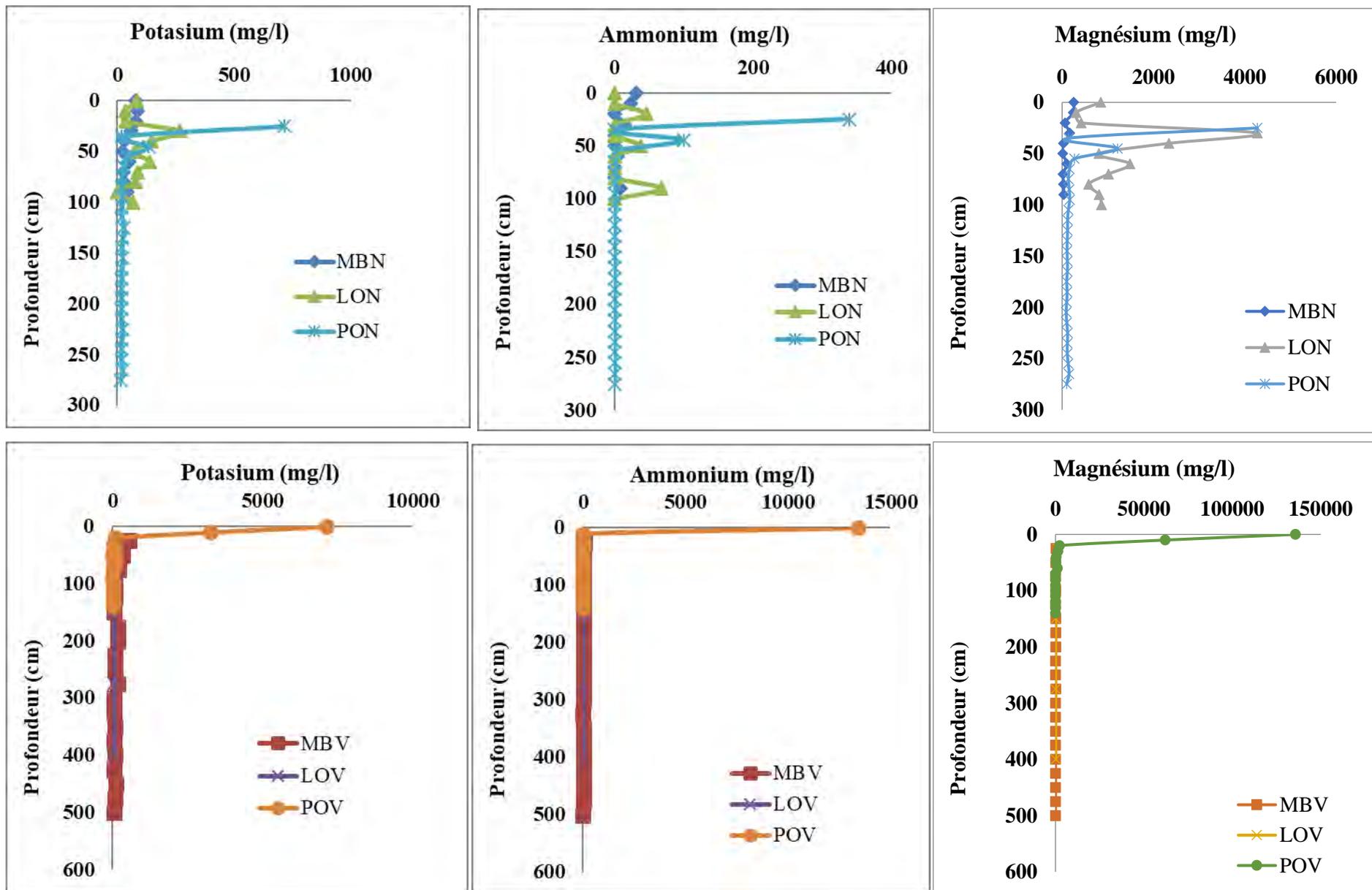


FIGURE VIII-8 : Distribution des ions K, NH₄ et Mg le long de la ZNS dans les eaux interstitielles dans les stations centres et Versant des Niayes Mboro, Lompoul et Potou en Février 2012

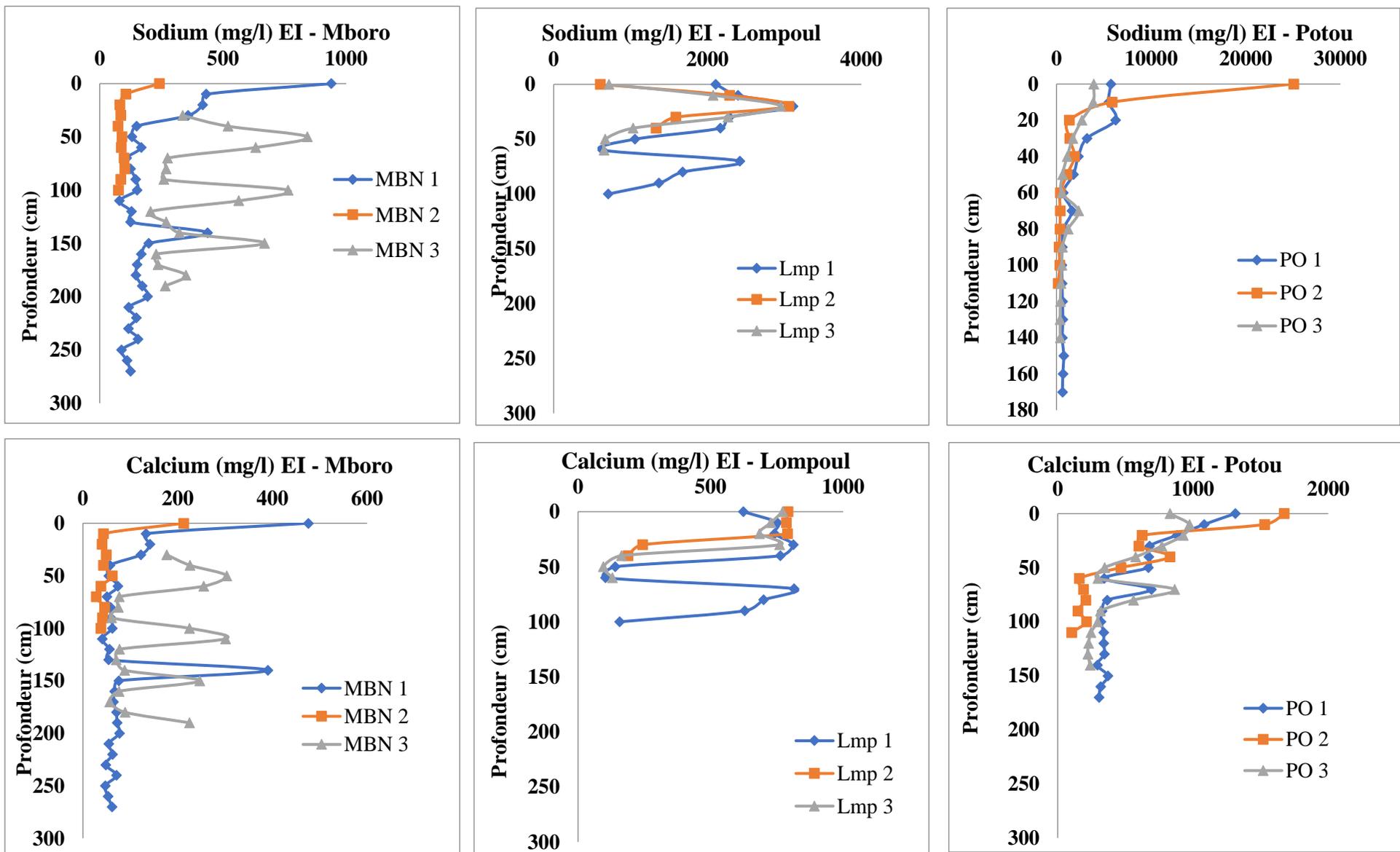


FIGURE VIII-9 : Distribution des ions Na et Ca le long de la ZNS de trois profils dans les eaux interstitielles dans les stations centres des Niayes Mboro, Lompoul et Potou en Octobre 2012

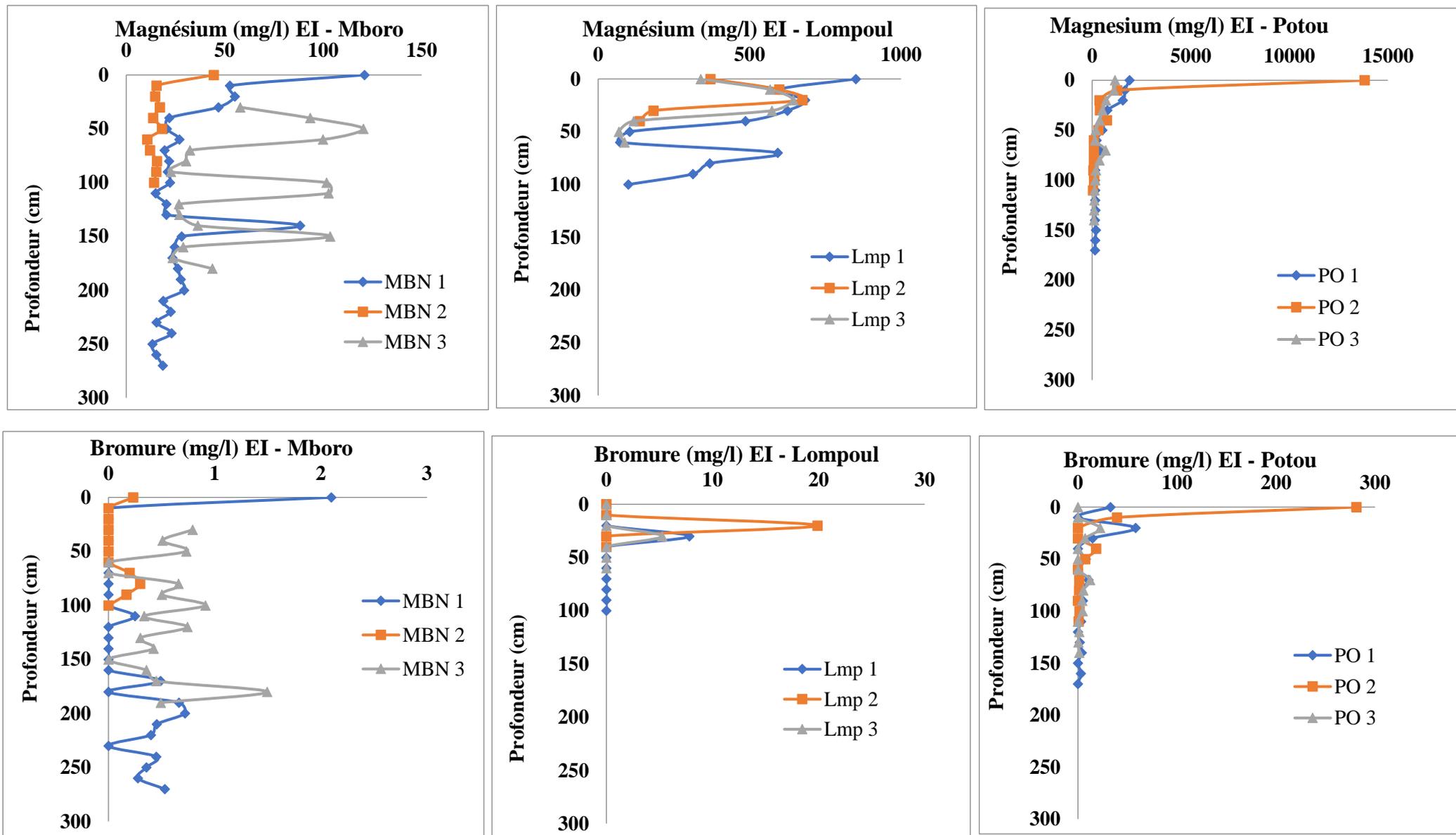


FIGURE VIII-10 : Distribution des ions Mg et Br le long de la ZNS de trois profils dans les eaux interstitielles dans les stations centres des Niayes Mboro, Lompoul et Potou en Octobre 2012

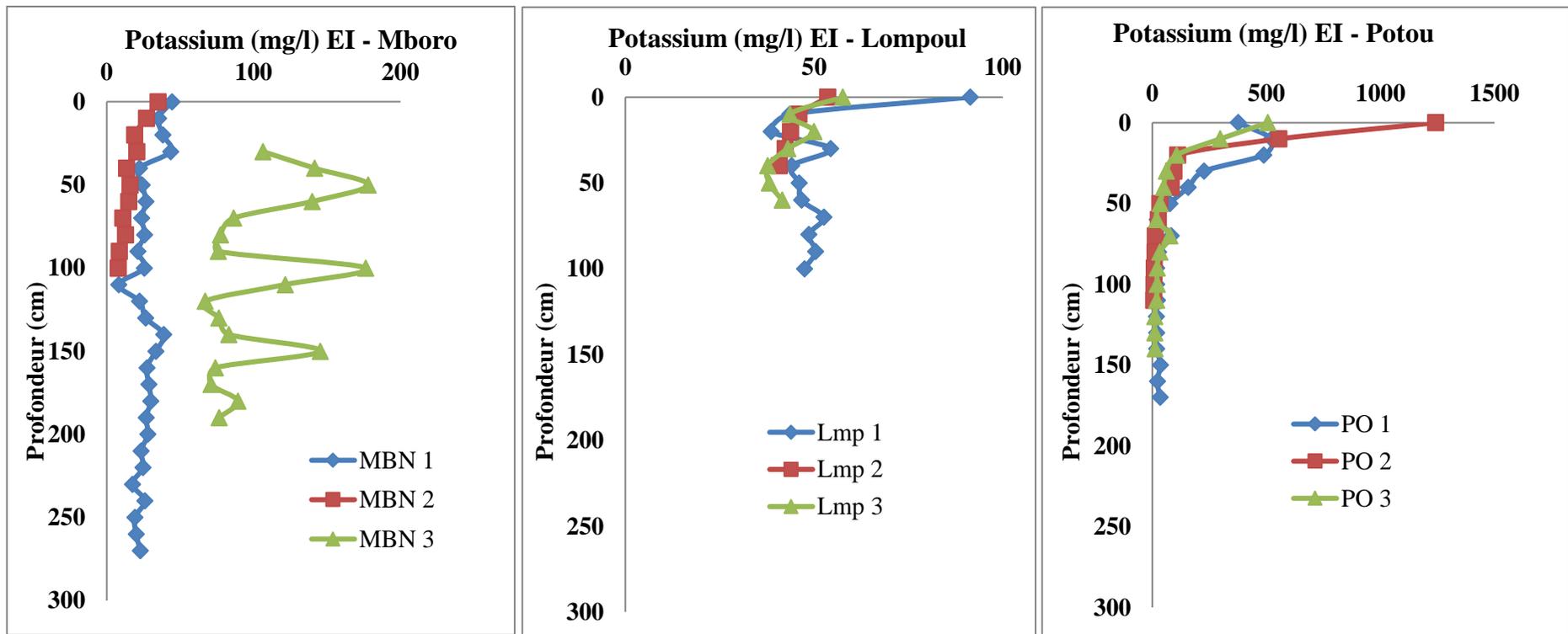
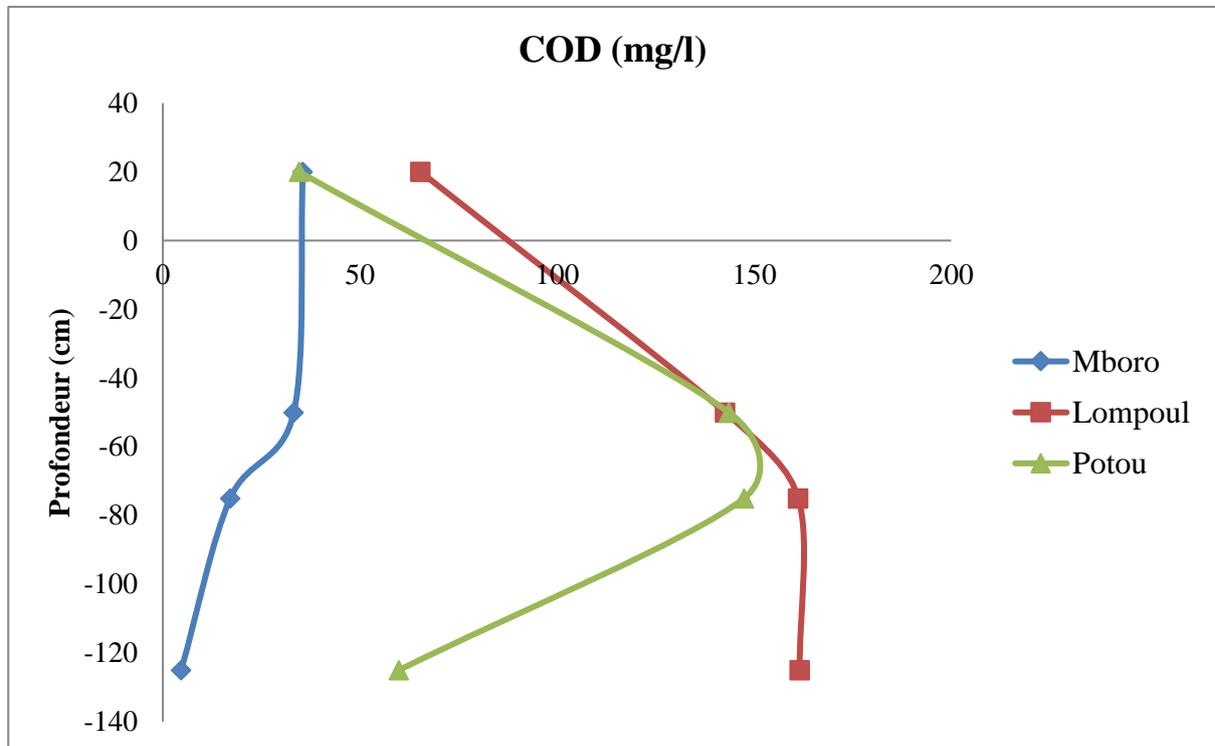
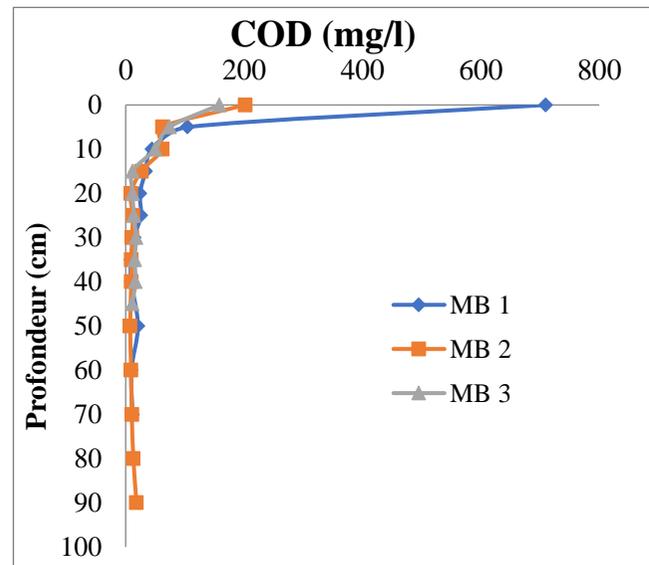
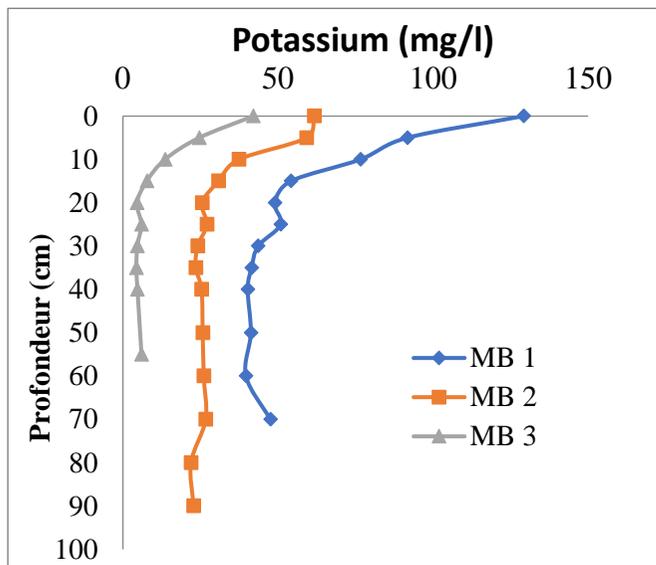
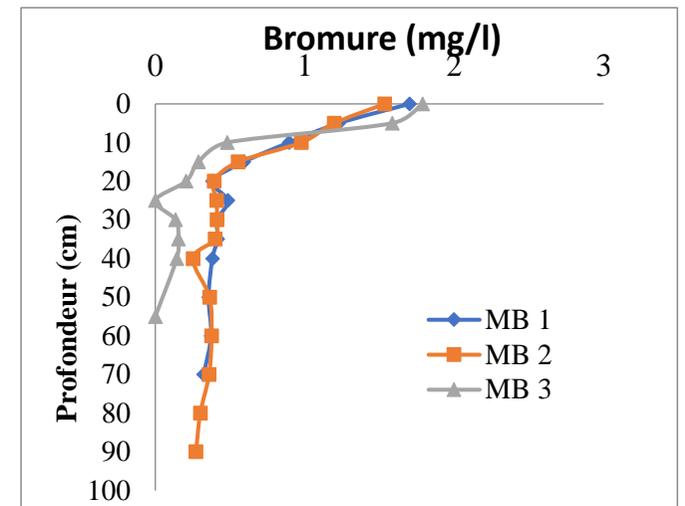
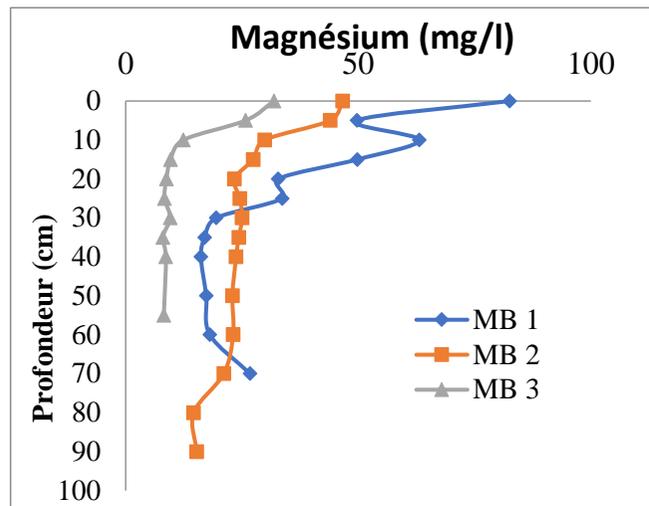
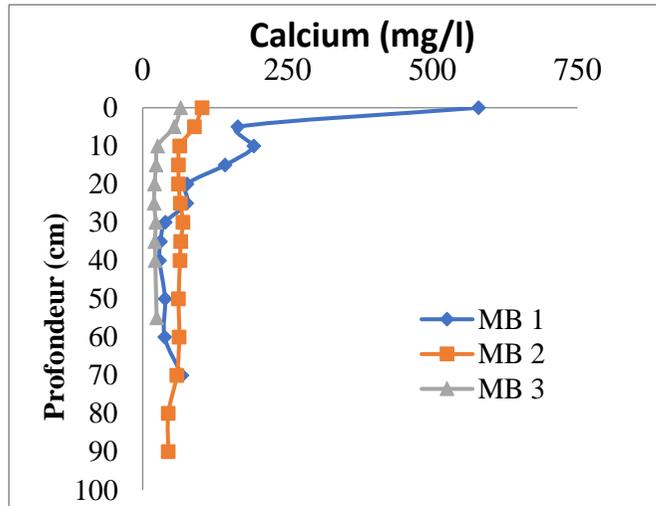


FIGURE VIII-11 : Distribution des ions K le long de la ZNS de trois profils dans les eaux interstitielles dans les stations centres des Niayes Mboro, Lompoul et Potou en Octobre 2012

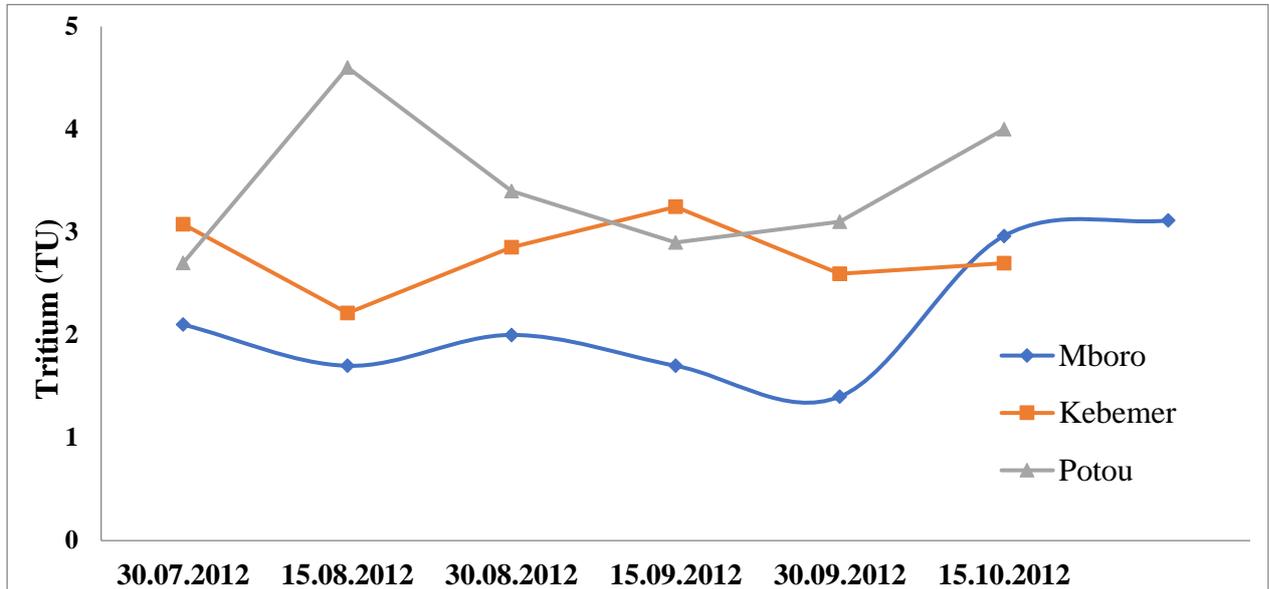
Annexe XII : Carbone Organique Dissous dans les eaux de subsurfaces et les eaux interstitielles issus des bougies poreuses en Octobre 2013



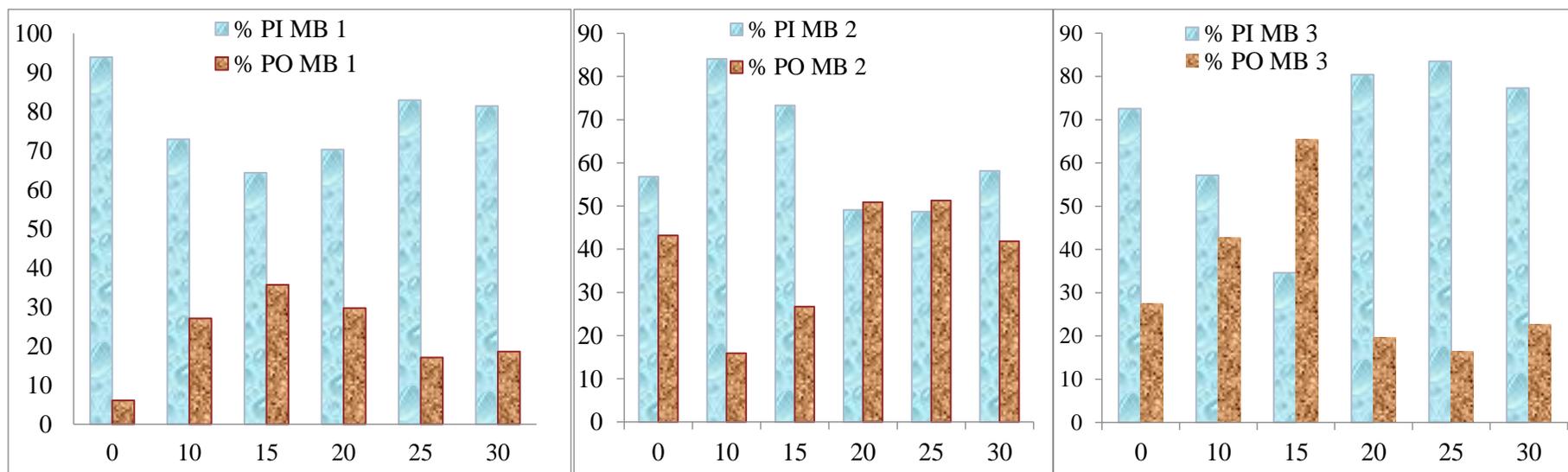
Annexe XIII : Distribution des ions Ca, Mg, Br, K et du COD dans les stations versant (MB1), centre (MB2) et bas-fond (MB3) en Octobre 2013



**Annexe XIV : Variation temporelle du Tritium en fonction dans les pluies de Mboro ,
Kebemer et Potou**



Annexe XV : Distribution du Phosphore Organique (PO) et du Phosphore Inorganique (PI) dans les stations versant (MB1), centre (MB2) et bas-fond (MB3) de la Niaye Mboro



RESUME

Située dans la partie occidentale du Sénégal, le Littoral Nord est une bande côtière de 110 km qui s'étend de Kayar à Saint Louis. Elle est caractérisée par un climat soudano-sahélien au Sud à sahélien au Nord et par une succession de dunes et d'inter-dunes. Ces dernières sont des zones humides localement appelées « Niayes » à fort potentiel agricole. Elles sont menacées par la pression anthropique, les changements climatiques et environnementaux associés au développement du secteur minier. Cette thèse présente ainsi deux axes de réflexion : (i) évaluer quantitativement et qualitativement la ressource en eaux souterraines du Littoral Nord ainsi que sa variabilité spatio-saisonnière à l'échelle régionale au vu des nouvelles contraintes ; (ii) comprendre le fonctionnement hydrogéochimique et sédimentaire de l'écosystème des Niayes qui caractérise le secteur à l'échelle locale. La stratégie d'échantillonnage à l'échelle régionale a été faite par le suivi piézométrique, physico-chimique, chimique et géochimique des eaux de la nappe sur trente-deux sites au cours de quatre campagnes. A l'échelle locale, trois sites pilotes, Mboro, Lompoul et Potou, ont été ciblés respectivement au Sud, Centre et Nord de la grande côte.

Ainsi, la fluctuation de la nappe montre un gradient décroissant de la ressource du Sud au Nord et une hausse significative au cours de l'année 2010 où la pluviométrie a été supérieure à 400 mm de Mboro à Saint Louis. Cette nappe présente des conductivités variant entre 162 $\mu\text{s/cm}$ en saison humide à 3590 $\mu\text{s/cm}$ en saison sèche. Les pH généralement acides sont dus à une forte activité agricole et industrielle surtout au Sud du secteur. La recharge de la nappe est variable en fonction des sites et des conditions du milieu avec en moyenne de 3 mm/an au Nord à 44 mm/an au Sud. Cette nappe présente quatre familles chimiques (Ca-SO_4 , mixte- Cl/SO_4 , Na-Cl , mixte- Cl et mixte- HCO_3) à dominance Na-Cl en saison sèche et humide, et mixte- HCO_3 après la recharge différée de la nappe en mi-saison sèche. Leur minéralisation est issue des processus naturels et anthropiques en fonction des sites et des saisons. Les eaux d'infiltration sont récentes et évaporées provenant à la fois du fractionnement isotopique à la surface du sol et lors du transfert dans la zone non saturée.

Aussi, les faciès sédimentaires des Niayes sont silteux à sablo-silteux au Sud, sableux très fins à fins au centre et Nord du secteur. Les eaux interstitielles sont plus minéralisées dans les stations versants par rapport aux stations centres et davantage en surface qu'en profondeur. La matière organique est riche en substances hydrocarbonés à Mboro, évoluée à Lompoul et minéralisée à Potou. Elle principalement issue de la production primaire et de l'activité bactérienne associés à différents processus biogéochimiques. A fine échelle, la Niaye de Mboro montre une forte minéralisation sur le versant, une station centre riche en matière organique, et une station bas-fond dépendante de la fluctuation de la nappe qui influence la chimie de ces eaux. Les flux d'échange de phosphore, majoritairement lié au fer, à l'interface eau-sédiment sont plus importants sur le versant et ceux de l'ammonium dans la station bas-fond. Ces zones humides sont caractéristiques d'une lagune littorale à Mboro, un marais saumâtre à salin saisonnier à Lompoul et une prairie humide à Potou arrosée par la nappe où se pratiquent des activités maraichères plus intenses sur les stations versants et que celles des centres. Ainsi, le mode de fonctionnement hydrogéochimique et sédimentaire des Niayes est hétérogène à l'échelle régionale du Littoral Nord.

Mots Clés : Zone Humide – Nappe – Zone non saturée – Hydrochimie - Géochimie - Recharge - Bilan hydrique - Isotopie - Matière Organique - Flux de nutriments - Littoral – Sénégal

ABSTRACT

Located in the western part of Senegal, the Littoral Nord, a coastal strip of 110 km which extends from Kayar to Saint Louis. It is characterized by a sudano-sahelian in the South to sahelian climate in the North and by a succession of dunes and depressions. These latter are wetlands locally called "Niayes" with strong agricultural potential. They are threatened by anthropogenic pressure, climate and environmental changes associated with the development of the mining sector. This thesis presents two main points of reflection: (i) to evaluate quantitatively and qualitatively the groundwater resources of the North Littoral, and its spatial and seasonal variability at the regional scale due to new constraints; (ii) understand the hydrogeochemical and sedimentary functioning of the Niayes ecosystem that characterizes this area at the local scale. The sampling strategy was carried out by piezometric, physico-chemical, chemical and geochemical monitoring of groundwater at 32 sites over four campaigns. At the local scale, three pilot sites, Mboro, Lompoul and Potou, were targeted respectively in the South, Center and North of the Great Coast.

The groundwater fluctuation shows a decreasing gradient of the resource from the South to the North and a significant increase during 2010 when the rainfall was over 400 mm from Mboro in Saint Louis. This groundwater has conductivities varying between 162 $\mu\text{s/cm}$ in the wet season to 3590 $\mu\text{s/cm}$ in the dry season. The generally acidic pH is due to a strong agricultural and industrial activity especially in the southern part. Recharge of the aquifer varies according to the sites and the environmental conditions with an average of 3 mm/year in the North to 44 mm/year in the South. This groundwater has four chemical families (Ca-SO_4 , mixte- Cl/SO_4 , Na-Cl , mixte- Cl et mixte- HCO_3) with Na-Cl predominance in dry and wet seasons and mixed- HCO_3 after deferred recharge in mid-dry season. Their mineralization is derived from natural and anthropogenic processes depending on the sites and the seasons. Groundwater are recent and evaporated comes from both isotopic fractionation at the soil surface and transfer to the unsaturated zone.

Also, Niayes sedimentary facies are silty to sandy silt in the South, fine sandy to fine in the center and North of the area. Interstitial waters are more mineralized in the slope of depression than in the central and lowland stations more on the surface than in the deep. The organic matter is rich in hydrocarbon substances in Mboro, evolved in Lompoul and mineralized in Potou. It is mainly derived from primary production and bacterial activity associated to various biogeochemical processes. On a fine scale, the Mboro wetlands shows a strong mineralization on the slope, a center station rich in organic matter, and a lowland station dependent on the groundwater table fluctuation which influencing the chemistry of this water. The phosphorus exchange flux, predominantly linked to iron, at the water-sediment interface are more important on the slope and ammonium flux in the lowland station. These wetlands are characteristic of a coastal lagoon at Mboro, a seasonal brackish to saline marsh in Lompoul and a wet prairie in Potou watered by the groundwater where more agricultural activities are practiced at the slope side station more than central and lowland stations. Thus, the hydrogeochemical and sedimentary functioning mode of these Niayes is heterogeneous according to regional scale of North Littoral.

Key Words: Wetland - Groundwater - Unsaturated zone - Hydrochemistry - Geochemistry - Recharge – Water Balance - Isotopy - Organic Matter - Nutrient flow – Littoral – Senegal