

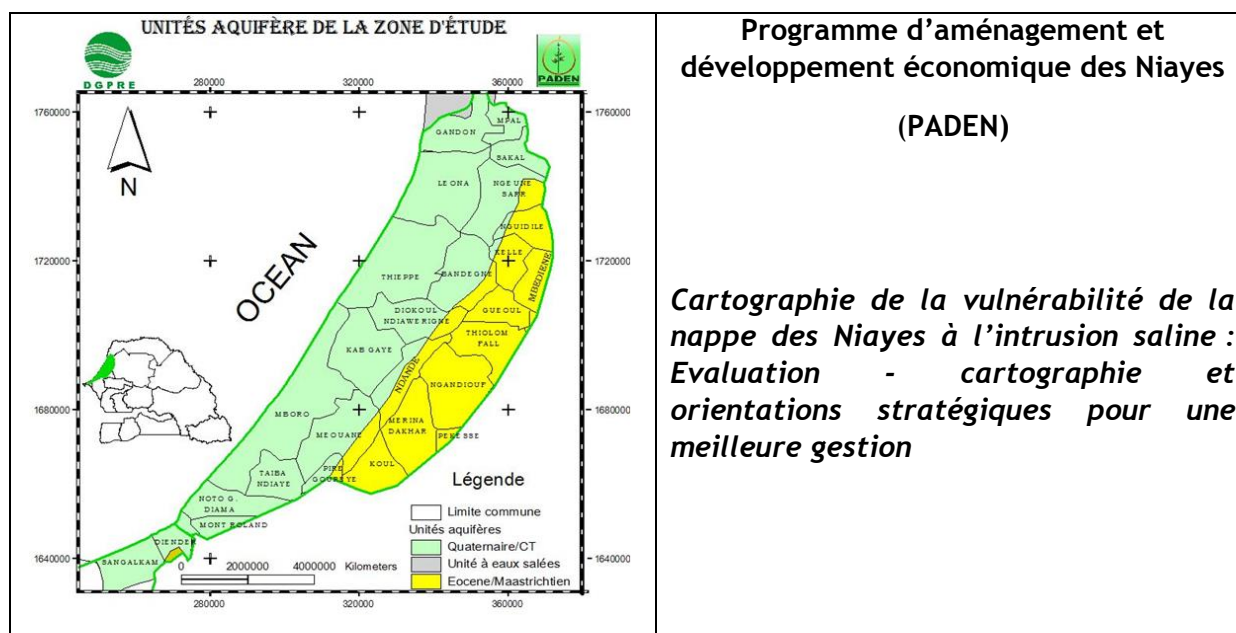
République du Sénégal



Un Peuple - Un But - Une Foi

MINISTÈRE DE L'HYDRAULIQUE ET DE L'ASSAINISSEMENT

**Direction de la Gestion et de la
Planification des Ressources en Eau**



Rapport final de cartographie de la vulnérabilité et orientations stratégiques R2

Version	Objet de la révision	Date	Etabli par	Vérifié et approuvé par
01	Version provisoire	Fevrier 2017	Pr. Serigne FAYE	DGPPE

Sommaire

Acronymes	4
Liste des figures.....	5
1. Introduction	7
1.1. Contexte, problématique et justification	7
1.2. Rappel des objectifs et attendus de la mission	8
1.3. Objectifs du présent rapport	10
2. Contexte géographique, géologique et hydrogéologique	10
2.1. Localisation de la zone du projet	10
2.2. Contexte géologique	16
2.3. Contexte hydrogéologique	17
3. Méthodologie d'investigations	23
3.1. Données thématiques	24
3.1.1. Données de suivi hydrogéologiques.....	24
3.1.2. Données géophysiques.....	28
3.1.2. Données géométriques de l'aquifère.....	30
3.1.4. Données cartographiques.....	32
3.2. Méthodes de traitement des données	33
3.3. Méthodes d'analyse de l'intrusion saline	33
4. Résultats	34
4.1. Situation actuelle de la piézométrie et de la chimie	34
4.2. Analyse des chroniques de données	40
4.3. Etudes géophysiques	44
4.4. Analyse de la vulnérabilité.....	48
5. Orientations stratégiques	56
5.1. Cadrage - Objectifs	56
5.2. Orientations stratégiques	57
5.2.1. Amélioration des connaissances sur le fonctionnement de la nappe.....	57
5.2.2. Maîtrise des pressions et usages sur la ressource.....	57
5.2.3. Développement de gestion intégrée et dynamique à l'échelle de la région	57
5.2.4. Optimisation de l'exploitation dans les zones vulnérables pour une perspective durable	58

5.2.5. Intégration des enjeux de développement liés aux ressources en eau.....	59
5.3. Mécanismes de mise en œuvre et plans d'action.....	59
6. Conclusion et recommandations	63
Références bibliographiques	65
ANNEXES : chroniques de mesures au niveau des ouvrages de suivi.....	66

Acronymes

AEP : Alimentation en eau potable

BACDI : Bureau d'appui à la coopération canadienne

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

DEA : diplôme d'études approfondies

DGPRES : Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau

F.I.T : front intertropical

GCO : Grande Côte Opération

ICS : Industries chimiques du Sénégal

MHA : Ministère de l'Hydraulique et de l'Assainissement

OMD : objectifs du millénaire pour le développement

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

PADEN : Programme d'aménagement et développement économique des Niayes

PELT : Projet Eau Long Terme

Progres : Programme de Gestion des Ressources en Eau Souterraine

ROM : rapport d'orientation méthodologique

SIG : Système d'Information Géographique

SONES : Société Nationale des Eaux du Sénégal

SRTM : Shuttle Radar Topography Mission

UCAD : Université Cheikh Anta Diop de Dakar

Liste des figures

Figure 1 : localisation de la zone d'étude

Figure 2 : Evolution de la pluviométrie annuelle au niveau des stations de Thiès, Louga et Saint Louis

Figure 3 : représentation géomorphologique de la zone d'étude

Figure 4 : Typologie des sols dans la région

Figure 5 : système aquifère du Littoral Nord

Figure 6 : Coupe hydrogéologique SSW-NNE et E-W (Pernel et Gageonnet 1992) modifié

Figure 7 : Carte piézométrique de la zone du Littoral Nord en juillet 2010, Juin 2011, Février 2012 et octobre 2012

Figure 8 : Chronique de l'exploitation dans la zone du Littoral de 1976 à 2011

Figure 9 : Ouvrages par programme considérés dans cette étude

Figure 10 : Types d'ouvrages suivis dans les différents programmes

Figure 11 : localisation des études géophysiques antérieures et celles du PELT

Figure 12 : localisation des profils géophysiques réalisés par Diouf (1995)

Figure 13 : morphologie du mur de l'aquifère des sables et calcaires

Figure 14 : morphologie de la surface du sol

Figure 15 : morphologie de l'intrusion saline d'après Ghyben-Herzberg

Figure 16 : Configuration actualisée de l'écoulement du système

Figure 17 : cartes distribution de la conductivité électrique à différentes dates (1983, 1993, 2003 et 2016)

Figure 18 : tendance évolutive du niveau statique et de conductivité électrique au niveau de quelques ouvrages

Figure 19 : position du biseau sale en 1973 à Mboro, Fass Boy et Lompoul

Figure 20 : coupe électrique interprétative de la frange littorale (Diouf, 1995)

Figure 21 : carte de vulnérabilité établie à partir de l'analyse

Figure 21a : carte de vulnérabilité de la zone sud

Figure 21b : carte de vulnérabilité de la zone sud

Figure 21c : carte de vulnérabilité de la zone nord

Liste des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des programmes de suivi

Tableau 2 : paramètres in situ mesures par programme

Tableau 3 : paramètres chimiques mesures par programme

Tableau 4 : Caractéristiques du modèle de GALDIT

1. Introduction

1.1. Contexte, problématique et justification

La zone d'intervention du PADEN fait partie de la région de la Grande Côte. Elle correspond à la zone des Niayes localisée le long du littoral maritime entre Dakar et St-Louis sur une bande de 180 km de long et de 5 à 30 km de large. Les Niayes qui sont d'anciennes vallées et dépressions inter dunaires constituent aujourd'hui la principale zone de production horticole du pays avec plus de 60% de la production du pays et 80% des exportations horticoles. Cependant, la gestion du territoire exige de tenir compte de la spécificité éco géographique de la région mais également la dégradation accélérée de ses ressources naturelles (eau, sols et végétation). C est dans ce cadre que le Gouvernement de la République du Sénégal a obtenu auprès du Bureau d'appui à la coopération canadienne (BACDI) le financement du Programme d'Aménagement et de Développement Economique des Niayes (PADEN) qui s'articule autour de deux axes majeurs :

- l'appui au développement horticole et agro-forestier
- l'appui au renforcement des capacités des structures d'appui et de services aux producteurs.

Deux objectifs globaux sont visés par ce programme :

- contribuer à réduire de 50% l'incidence de la pauvreté des ménages sénégalais d'ici l'an 2015 par un appui à la stratégie du Sénégal de réduction de la pauvreté, qui s'inspire de l'objectif 1 des objectifs du millénaire pour le développement (OMD-1);
- contribuer à mettre en valeur le potentiel productif des Niayes pour accroître les revenus des petits producteurs et productrices de la zone des Niayes et en faire de véritables entrepreneurs tout en protégeant les ressources naturelles.

Le PADEN est sous la responsabilité du Ministère de l'Agriculture avec l'appui de partenaires issus des services de l'Etat. Ses actions sont davantage concentrées dans les zones de fortes productions horticoles localisées surtout dans le corridor Dakar - Potou (environ 120 kilomètres).

Ce présent projet portant sur *la Cartographie de la vulnérabilité de la nappe des Niayes à l'intrusion saline : Evaluation - Cartographie et Orientations stratégiques pour une meilleure gestion* rentre dans le cadre de l'appui du renforcement des capacités des structures d'appui et de services aux producteurs. Il est pilote pour le compte du PADEN par la **Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau DGPRE/MHA**.

1.2. Rappel des objectifs et attendus de la mission

Dans le cadre de cette étude, il s'agit de faire une analyse critique du degré de vulnérabilité de la nappe des Niayes vis-à-vis de l'intrusion saline et de dégager des orientations stratégiques permettant un plein potentiel productif de l'écosystème des Niayes tout en prenant en compte la dimension la préservation pérenne de la ressource en eau et les contraintes anthropiques et climatiques. Cette étude devrait permettre également d'améliorer des connaissances sur les ressources en eau souterraines et le renforcement des capacités de la DGPRE en planification et en gestion des ressources en eau.

L'objectif global de cette étude est d'évaluer et de cartographier la vulnérabilité de la nappe du littoral nord du Sénégal à l'intrusion saline suite à l'impact anthropique et climatique actuel.

Il s'agira de façon spécifique de :

- Etablir la carte piézométrique de la nappe du littoral nord du Sénégal (année 2015 ou 2016) ;
- Evaluer le degré de vulnérabilité de la nappe du littoral nord du Sénégal à l'intrusion saline ;
- Présenter la carte de vulnérabilité de la nappe du littoral nord du Sénégal à l'intrusion saline dans un SIG ;
- Proposer des orientations stratégiques pour une meilleure prise en compte de la problématique du biseau salé dans la zone des Niayes.

Ci-après, nous rappelons très brièvement la méthodologie proposée lors de la soumission qui se déroule en trois phases:

Phase I : Compilation et analyse des données Synthèse sur le profil de vulnérabilité

Cette phase part de l'analyse documentaire ou les études antérieures et bases de données existantes dans la zone du projet devraient être répertoriées, consultées pour ensuite compiler dans une banque de données permettant d'évaluer l'état des lieux et de faire le diagnostic sur la dynamique de l'intrusion saline. Ces données qui proviennent de plusieurs sources (Projets : SEN026-SEN030-PAEP-PADEN-PELT-UGP-GCO, base de données de la DGPRE, mémoires de DEA etc..) devraient être intégrées dans un SIG pour identifier les zones non encore investiguées présentant des lacunes.

Phase II : Campagne de mesures Orientations stratégiques

Cette phase qui est en lien avec la phase I vise essentiellement à combler les lacunes identifiées lors du dépouillement. Elle permettra de faire l'analyse critique des données sur les niveaux de nappe, la qualité chimique et le degré de salinisation de la nappe. Il est prévu si nécessaire d'opérer à une petite sortie de terrain pour complément et réactualisation de l'information. Les éléments issus des phases I et II devront permettre de dégager le profil de vulnérabilité et proposer des orientations stratégiques dans le double but de maintenir le potentiel productif et la préservation et protection de la ressource en eau. Celles-ci pourront être des solutions de goutte à goutte, de transfert d'eau ou même d'utilisation des eaux de la nappe du Maastrichtien dans les zones où la ressource est menacée

Phase III : Elaboration du rapport et organisation d'un séminaire de restitution des résultats.

Comme indiquée, cette étape constitue la phase ultime du projet où le rapport final et sa restitution à l'atelier et la rédaction d'un rapport final de fin de projet.

Les résultats attendus de la présente étude sont :

- Une réactualisation de la carte piézométrique de la nappe du littoral nord du Sénégal pour l'année 2015 ou 2016;

- Une évaluation du degré de vulnérabilité de la nappe vis-à-vis de l'intrusion saline et sa cartographie dans une plateforme SIG ;
- Des orientations stratégiques pour une meilleure prise en compte de la problématique du biseau salé dans la zone des Niayes sont proposées.

1.3. Objectifs du présent rapport

Ce présent rapport vise particulièrement à établir la carte de vulnérabilité de la nappe vis-à-vis de l'intrusion saline à partir des données réactualisées et à proposer des orientations stratégiques de prévention, remédiation permettant un plein potentiel productif de l'écosystème des Niayes tout en prenant en compte la dimension la préservation pérenne de la ressource en eau et les contraintes anthropiques et climatiques.

2. Contexte géographique, géologique et hydrogéologique

2.1. Localisation de la zone du projet

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 sur une bande de 110 Km de longueur et une largeur de 3 à 30 Km le long du Littoral Nord de Kayar à Saint Louis 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.

Le régime climatique est de type sahélo-saharien caractérisé par une saison des pluies de trois mois (Juillet à Septembre) et une longue saison sèche (Novembre à Juin). 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 lorsque le front intertropical (F.I.T) atteint sa position septentrionale extrême. Ces mois les plus pluvieux reçoivent entre 55 et 65 % du total des précipitations interannuelles. L'évolution de la pluviométrie inter-annuelle des précipitations de 1930 à 2012 montre dans la zone une forte variabilité climatique marquée par des périodes excédentaires et

déficitaires et plus particulièrement la longue période déficitaire du sahel depuis les années 70 (Figure 2).

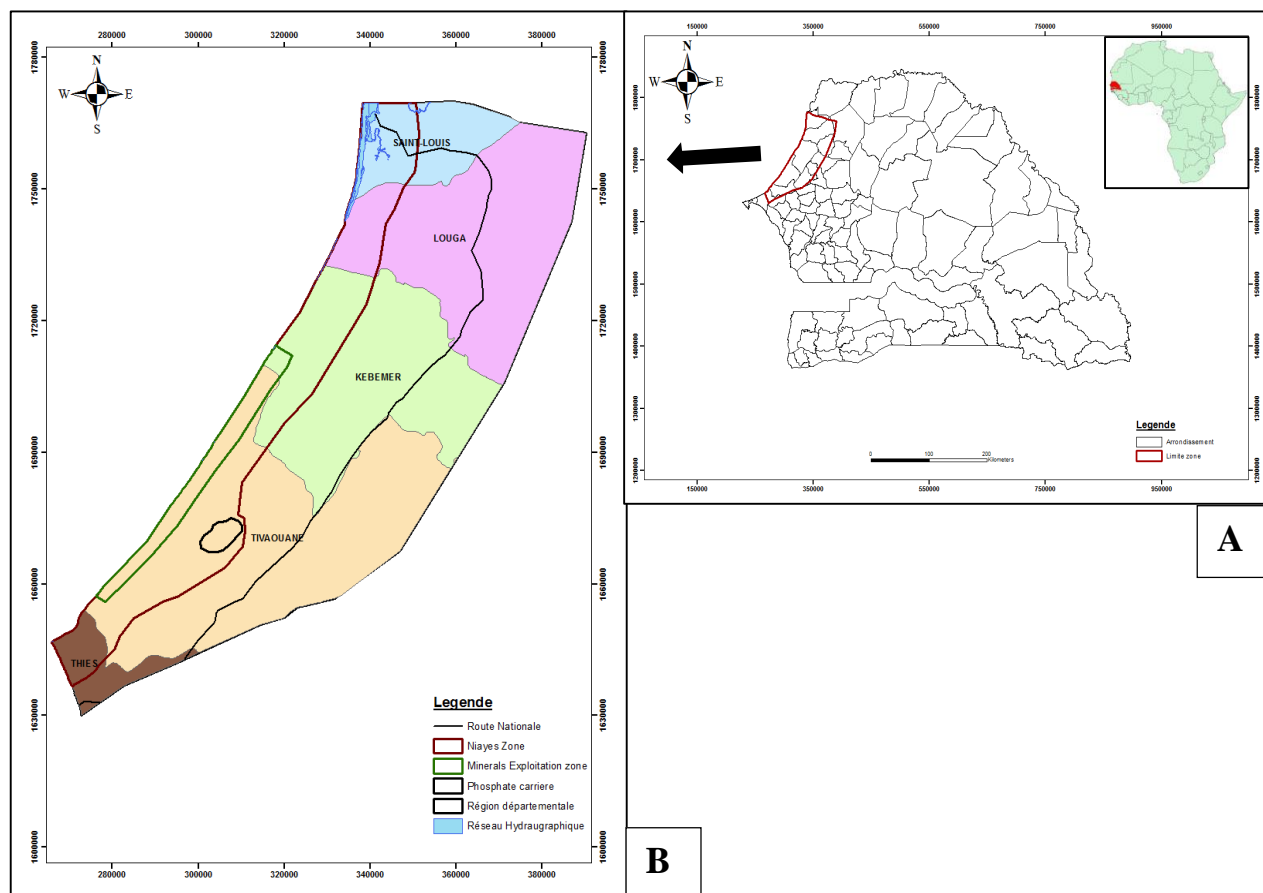


Figure 1 : localisation de la zone d'étude

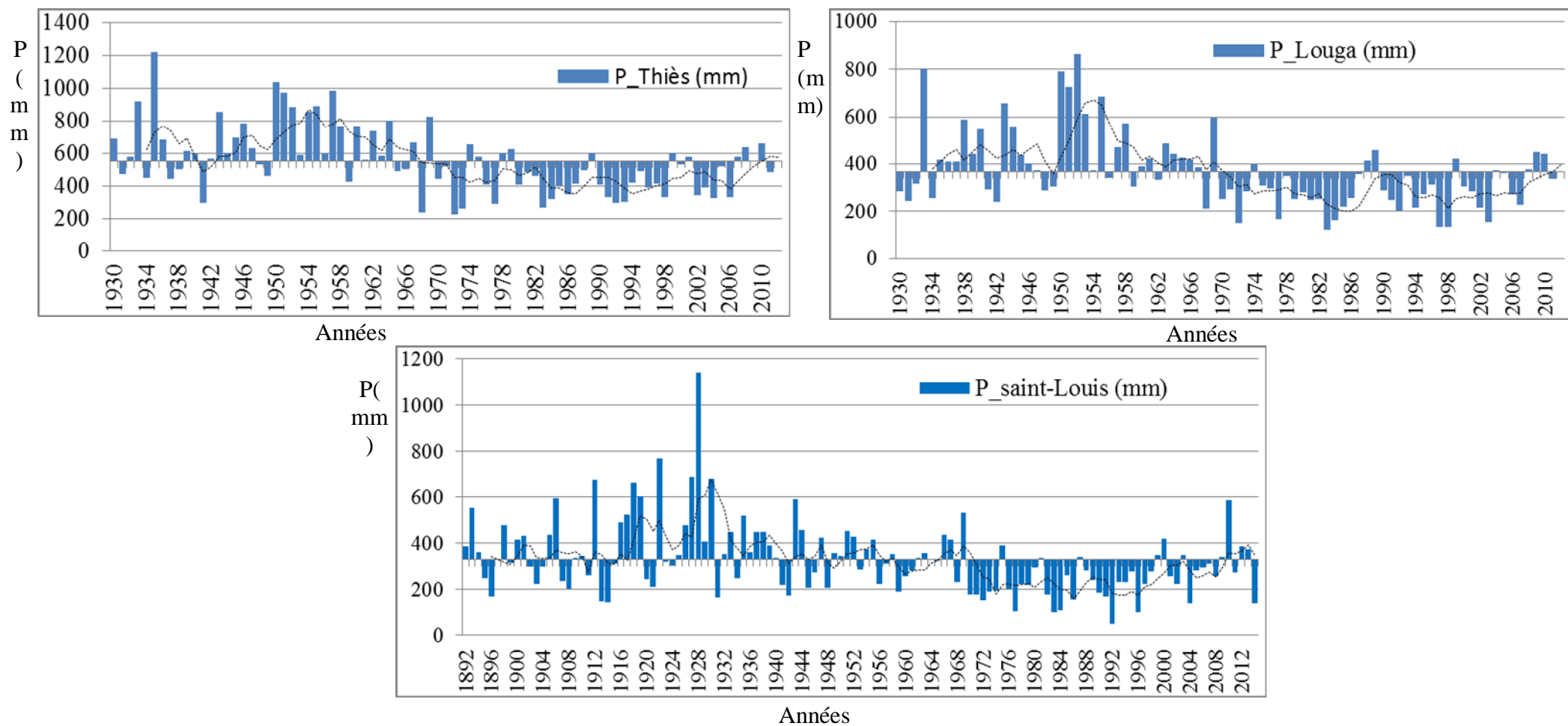


Figure 2 : Evolution de la pluviométrie annuelle au niveau des stations de Thiès, Louga et Saint Louis

Du point de vue géomorphologique, la région est caractérisée par des dunes littorales, localisées de Saint-Louis à Kayar, qui comprennent d'une part des dunes externes semi-fixées et vives; et d'autre part des dunes rouges fixées d'âge ogolien. Ces dunes externes semi-fixées et vives constituées de dépôts quaternaires subactuels et actuels, et situés à proximité du littoral comprennent les dunes vives blanches du cordon littoral et les dunes semi-fixées jaunes qui bordent le système ogolien remanié (Figure 3). Les « Niayes » sont des dépressions plus ou moins inondées formées à l'intérieur des dunes ogoliennes; elles ont des formes et dimensions très variables avec deux types :

- des Niayes de petites dimensions orientées NNW-SSE selon la direction des dunes ogoliennes remaniées qui correspondent à des émergences de nappe dans les interdunes les plus profondes ;
- des Niayes de superficie beaucoup plus vaste, qui peuvent pénétrer loin vers l'intérieur des terres, recoupant une partie importante des cordons des dunes rouges.

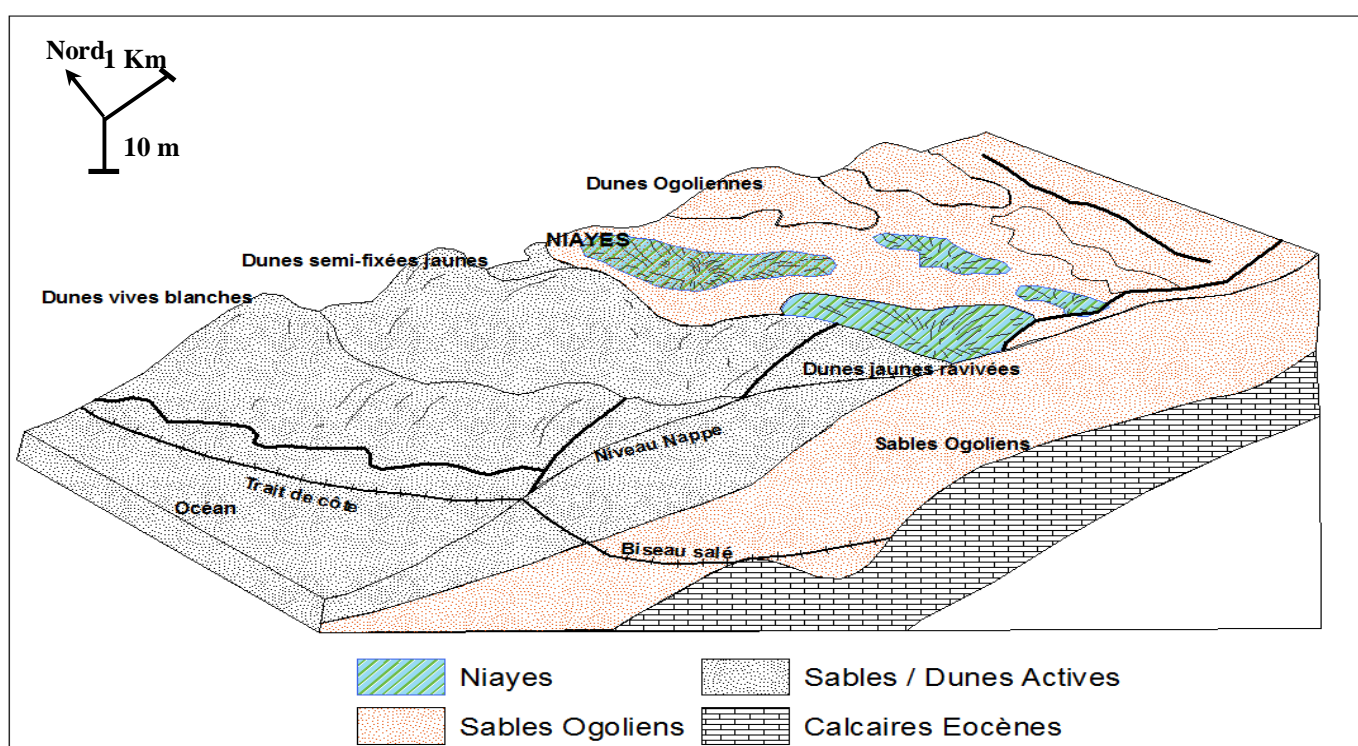


Figure 3 : représentation géomorphologique de la zone d'étude

Ces Niayes 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 revêtent une importance capitale dans le maintien d'un équilibre naturel pour la préservation des ressources ainsi que le développement de la faune et de la flore d'un écosystème.

Les sols

Trois principaux types de sols caractérisent la zone d'étude : sols ferrugineux tropicaux, sols peu évolués d'apport et sols hydromorphes (Figure 4).

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.

Sols minéraux peu évolués

Ces sols recouvrent les dunes vives ou semi-fixées du littoral. Dans la zone étudiée, ce sont des sols pauvres en matière organique notamment à Lompoul et faiblement minéralisé en ilménite.

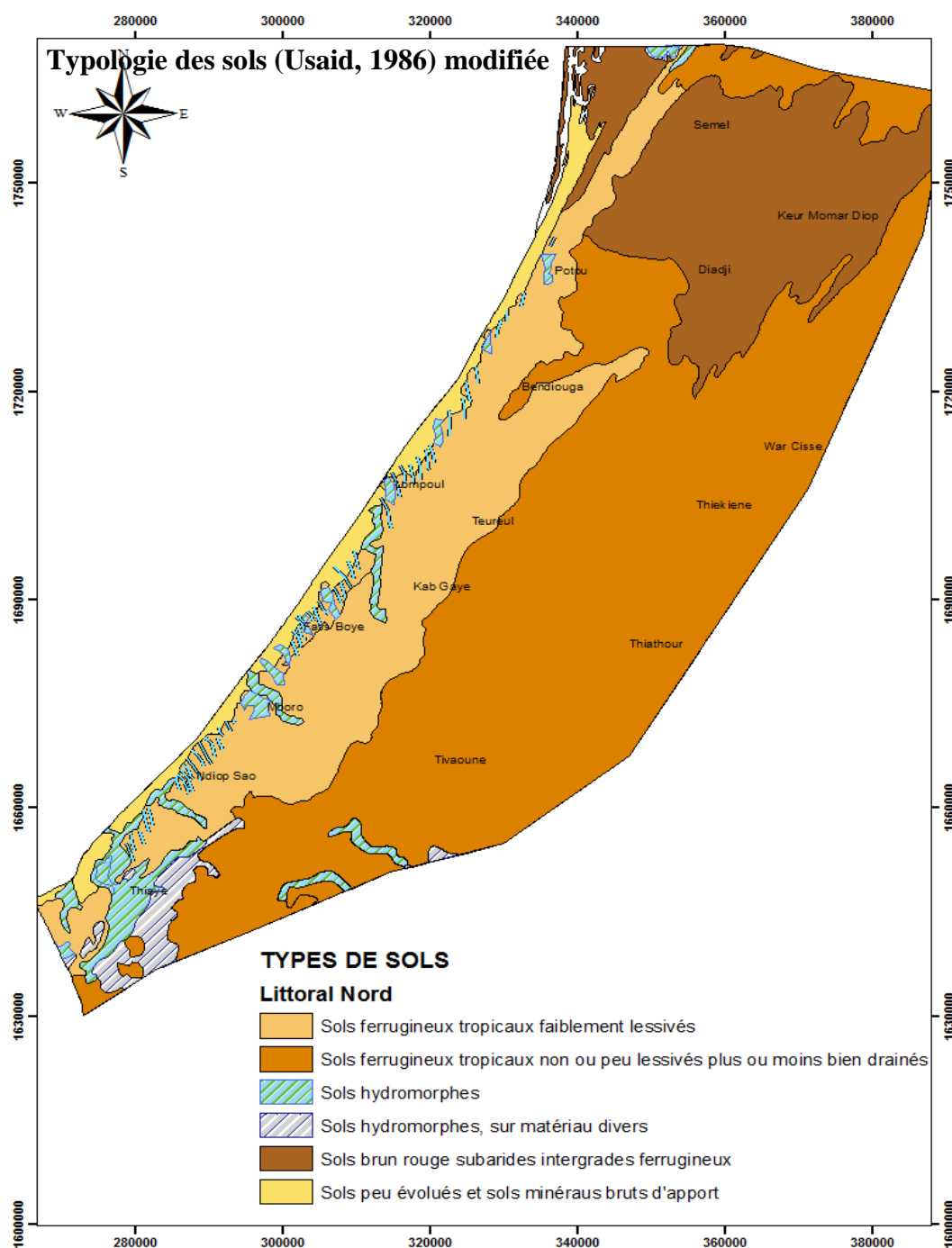
Sols hydromorphes

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 :

- 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.

A côté de ces 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 le Lac Tanma au Sud-Ouest du secteur d'étude.



Figure

Figure 4 : Typologie des sols dans la région

2.2. Contexte géologique

Le secteur appartient à la zone occidentale du bassin sénégalo-mauritanien dont les sédiments les mieux connus sont datés du Crétacé au Quaternaire. Pour les besoins de cette étude nous nous limitons uniquement à décrire les formations du quaternaire. Le **Quaternaire** constitue le terme supérieur et forme la majeure partie des affleurements de la série sédimentaire de la zone. 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.

L'histoire de la géodynamique du secteur a été consacrée à l'étude des formations quaternaires par plusieurs auteurs (Hébrard, 1958; Elouard et al, 1967; Martin, 1970; Hebrard, 1973; Michel, 1973; Faure et al. 1977; Faure, 1983; Pezeril et al., 1986). Elle distingue d'une part un Quaternaire ancien ou Pléistocène (composé de l'Inchirien et Ogolien) et d'autre part un Quaternaire récent ou Holocène (constitué du Tchadien, Nouakchotien, Tafolien, Sub-actuel et Actuel).

L'Inchirien (40 000 - 30 000 ans B.P.)

Constitue de formations margino-littorales retrouvées dans les niveaux enfouis du Delta du fleuve Sénégal ou en mer sur des fonds de - 20 à - 30 m. Ce sont des sables marins coquillers localement riches en ilménite (sables noirs) et recouverts par les sables éoliens présentant en surface une altération continentale.

L'Ogolien (20 000 - 12 000 ans 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'émousse 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).

Le Tchadien (12 000 - 7 000 ans B.P.)

Le Tchadien s'identifie par la formation des sols ferrugineux rouges sur les dunes ogoliennes,

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

Durant cette période, la mer transgressive pénètre dans les basses vallées et y provoque des dépôts d'argiles sableuses associés 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.

Le 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. La mer édifie les cordons littoraux de dunes jaunes qui ferment les golfes nouakchottiens et isolent des lagunes côtières sur-salées.

Le 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 qui tendent à ensevelir les dépressions des Niayes.

2.3. Contexte hydrogéologique

Le système aquifère du littoral Nord regroupe les sables quaternaires entre Kayar et Saint-Louis, les calcaires lutétiens dans la région de Louga, les calcaires de l'Eocène inférieur à Bambey et de Baba Garage (Figure 5). Il 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. Elles assurent 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 GCO. Ce système vient par ailleurs en appoint à l'AEP de la capitale Dakar et de ses villes environnantes.

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 5):

- 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 qui 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 (Pernel *et al.*, 1992).

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 (Pernel *et al.*, 1992; Diouf, 1995) mais d'un point de vue hydrogéologique, il s'agit d'un réservoir unique qui présente d'importantes réserves en eaux douces.

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 6). L'accident tectonique au NNE au niveau de Ndiok Sall montre la transition avec l'aquifère des calcaires lutétiens. Dans la zone centre du secteur au niveau de Kébémér, cet accident tectonique est observé montrant le passage de l'aquifère sableux à l'Ouest à l'aquifère calcaire à l'Est.



Figure 5 : système aquifère du Littoral Nord

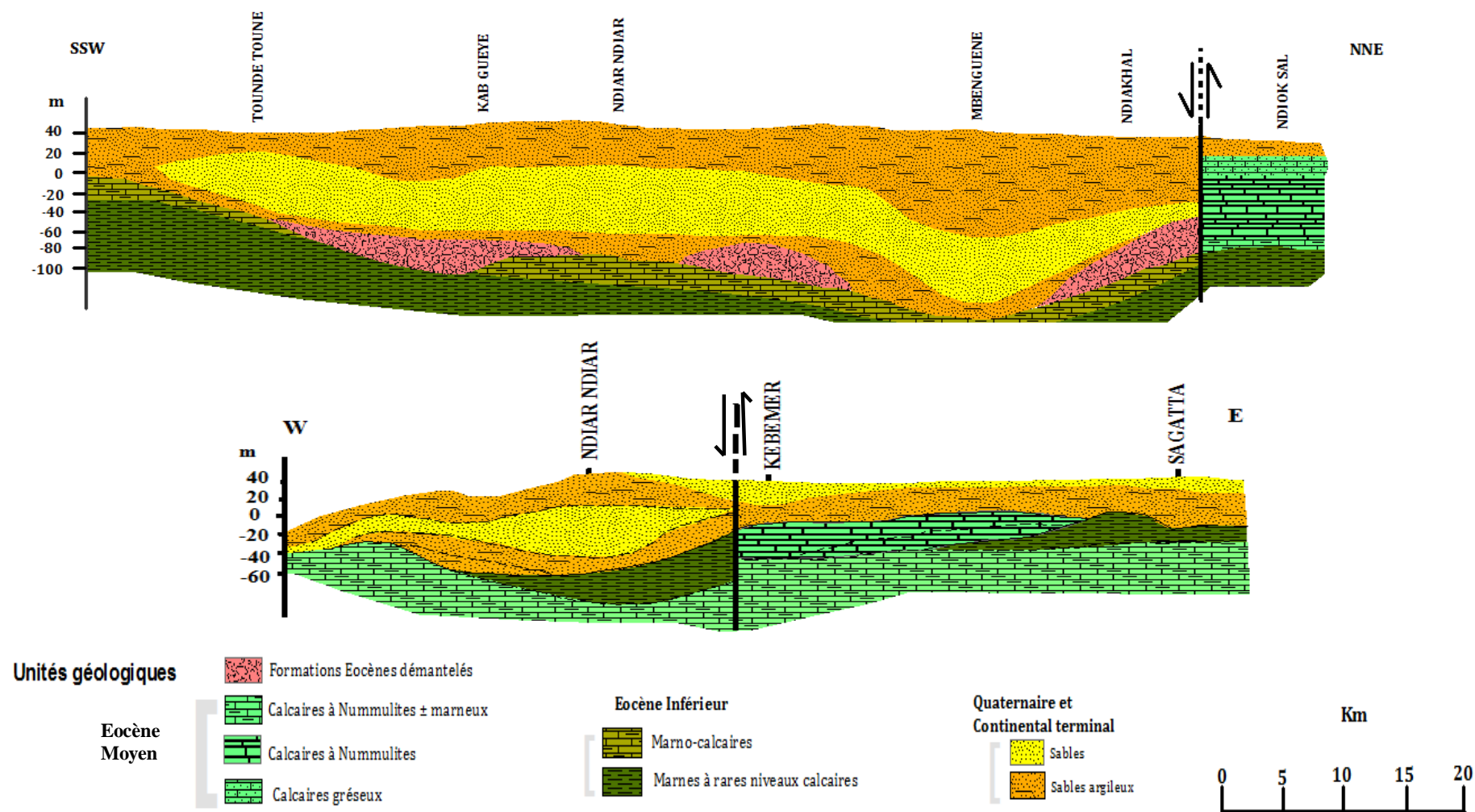


Figure 6 : Coupe hydrogéologique SSW-NNE et E-W (Pernel et Gageonnet 1992) modifié

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 zones humides littorales 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.

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.

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).

Des études récentes ont permis une réactualisation des données piézométriques de la nappe de 2010 à 2012 (thèse Mariama Kab, en cours). La morphologie identifiée se présente sous la même forme avec toutefois une baisse des niveaux de nappe surtout dans la zone du dôme.

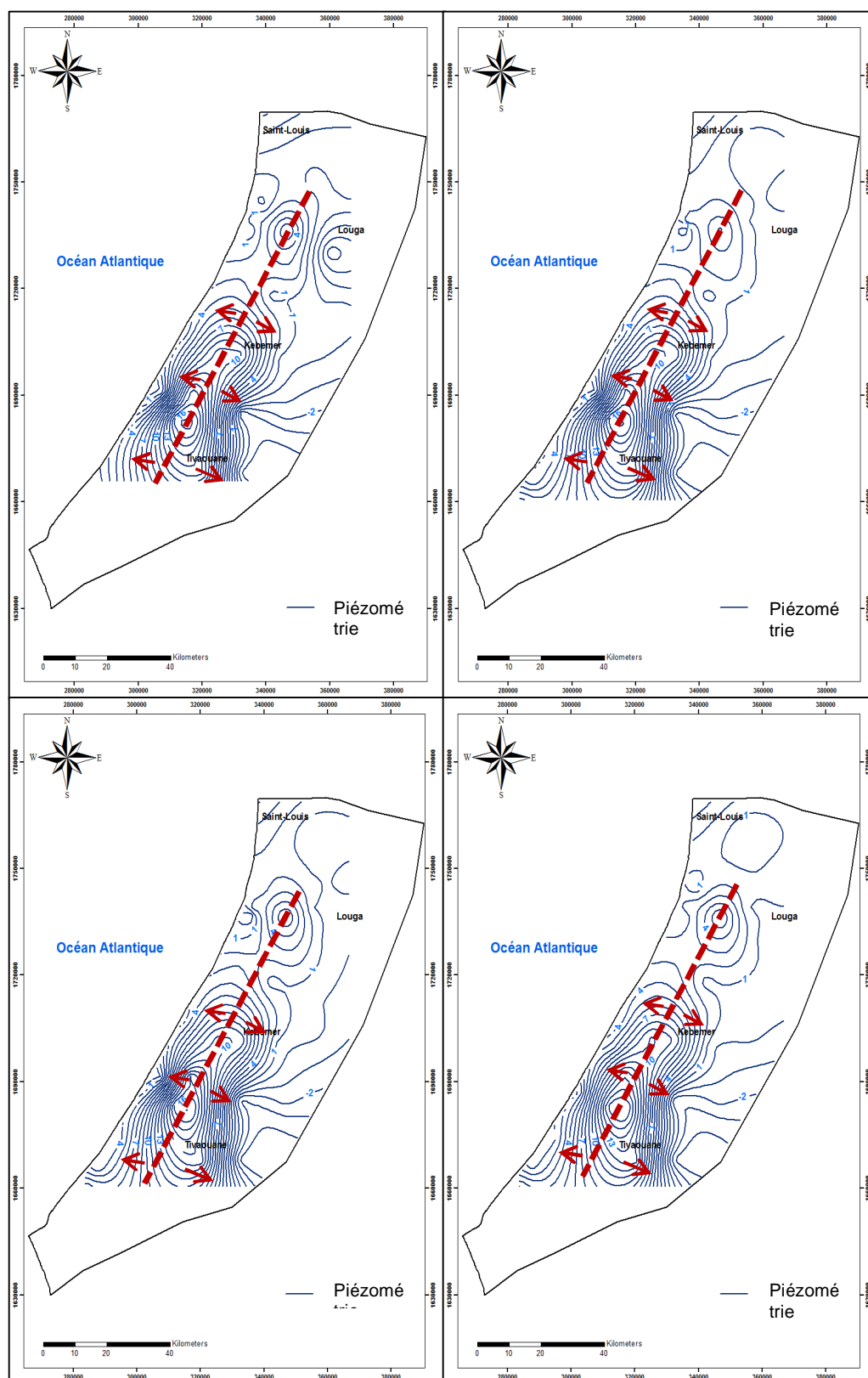


Figure 7 : Carte piézométrique de la zone du Littoral Nord en juillet 2010, Juin 2011, Février 2012 et octobre 2012

L'attractivité de la zone côtière et le développement des activités socio-économiques ont largement contribué à l'augmentation exponentielle 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 progressive des prélèvements est observée dans le secteur de 1976 à 2011 entre un minimum de 1 507 766 m³ en 1976 à un maximum de 22 827 812 m³ en 2004 (Figure 8).

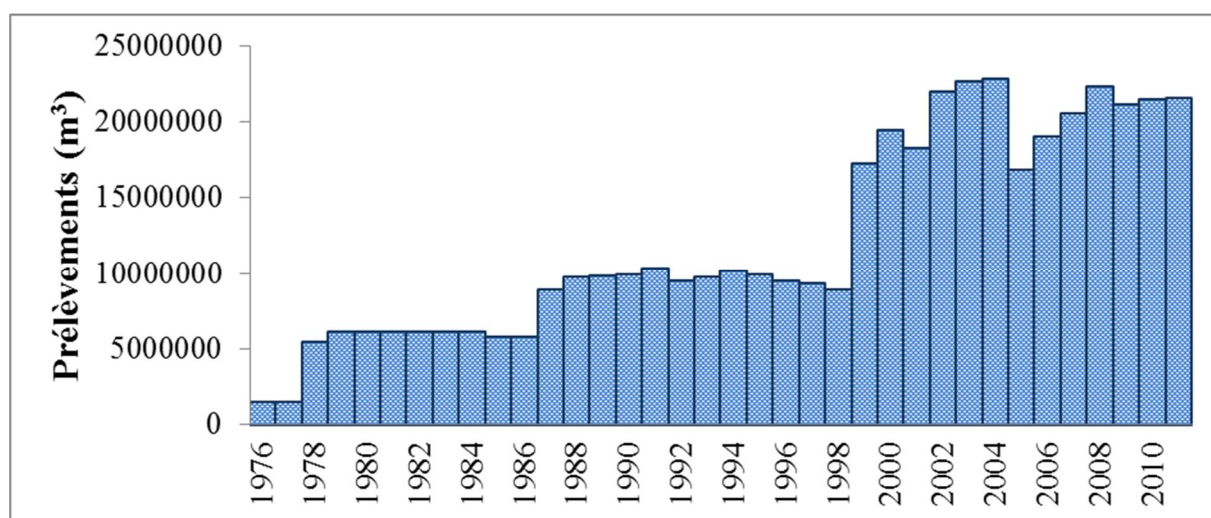


Figure 8 : Chronique de l'exploitation dans la zone du Littoral de 1976 à 2011

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. Néanmoins, les travaux BRGM (1992) ont estimé les prélèvements agricoles entre 250 000 et 540 000 m³/j.

3. Méthodologie d'investigations

Comme indiqué dans la proposition technique et dans le livrable R1 portant sur le ROM, la méthodologie d'investigations part de la collecte et de l'analyse des données existantes issues des travaux antérieurs et leur réactualisation suivies d'une analyse permettant d'établir le profil de vulnérabilité du système et une stratégie pour la préservation de la ressource. Ces données qui proviennent de

différentes sources ont été traitées, classées suivant les thèmes puis analysées selon les besoins de l'étude. Ci-après, nous présentons l'état des données et les méthodes de traitements appliqués.

3.1. Données thématiques

Elles concernent aussi bien les données de suivi de la nappe (hydrodynamiques et hydrochimiques) recueillies dans la base de données Progres, complétées par les données fragmentaires issues de divers projets (PSE, PELT, UGP, PAGIRE-BA, BRGM, PAEP, PADEN, SEN026, SEN030, GCO, rapports DEA et autres), que les données géophysiques, géométriques de l'aquifère.

3.1.1. Données de suivi hydrogéologiques

Le livrable R1 a fait l'état des données de suivi dans la zone du projet en termes de type de projet, de type d'ouvrages, d'étendue des chroniques et des paramètres de suivi. Nous nous ne reprenons ici que la carte de distribution des forages (figures 9 et 10) par programme et le tableau de synthèse des programmes de suivi (tableaux 1, 2 et 3), utilisés dans la constitution de la base de données pour l'analyse de la vulnérabilité. Il faut signaler que pour beaucoup d'ouvrages les chroniques sont moins longues. C'est pourquoi nous n'avons choisi que ceux qui sont pertinents pour l'analyse. Pour ces ouvrages, des chroniques d'enregistrement de niveau statique et de conductivité électrique (CE) sont considérées. Le choix de ces deux paramètres se justifie bien puisqu'ils traduisent la relation hydrodynamique nappe/eau de mer par contamination saline de même que l'évolution temporelle de la nappe vis-à-vis des pompages et de la recharge saisonnière.

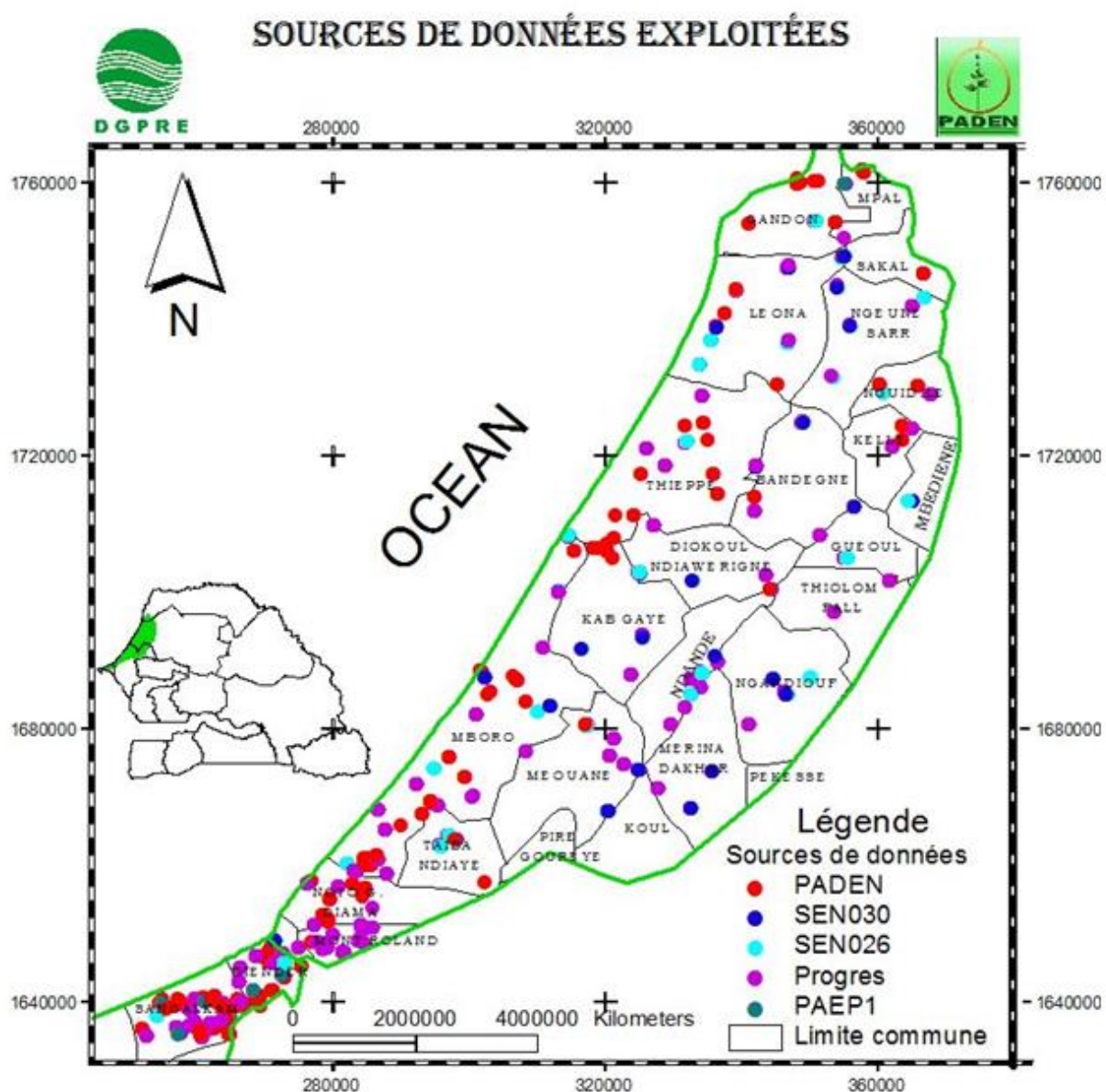


Figure 9: Ouvrages par programme considérés dans cette étude

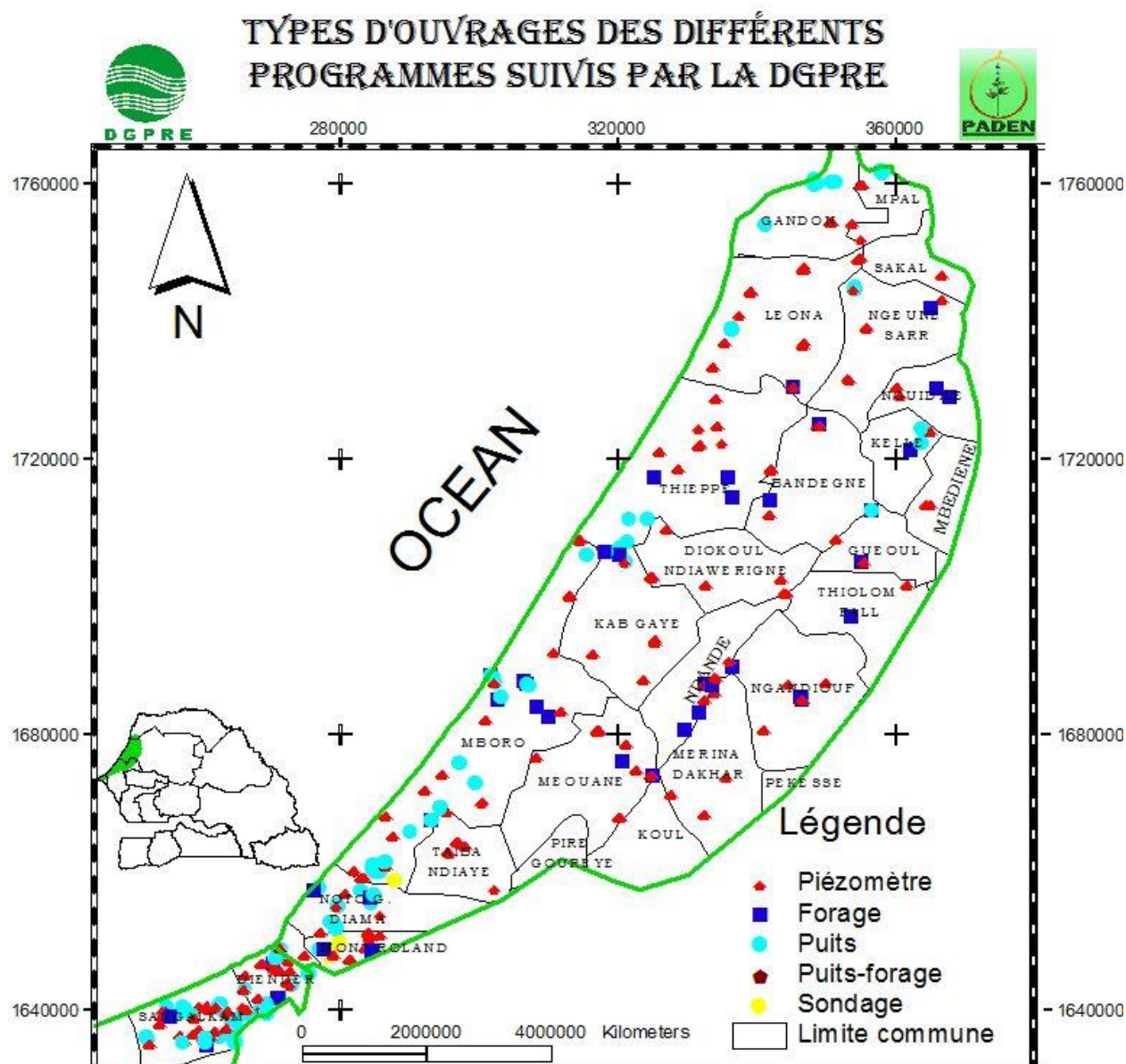


Figure 10 : Types d ouvrages suivis dans les différents programmes

Tableau 1 : Synthèse des programmes de suivi

Programmes	Période de suivi
PADEN	de 2012 à 2016
SEN030	de 2014 à 2016
SEN026	de 2009 à 2011
PAEP1	2007
PROGRES	de 2002 à 2006

Tableau 2 : paramètres in situ mesures par programme

	Paramètres mesurés sur le terrain						
	XCOORD	YCOORD	NS	COND	RS	T°	pH
Programmes							
PADEN	X	X	X	X	X	X	X
SEN030				X	X		X
SEN026	X	X	X	X	X	X	X
PAEP1	X	X	X	X	X	X	X
PROGRES	X	X	X	X	X	X	X

Tableau 3 : paramètres chimiques mesures par programme

	Paramètres analysés au labo													
	pH	CE	RS	CO3	HCO3-	Cl-	SO42-	N03-	Ca	Mg	Na	K	Fe	F
Programmes														
PADEN	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
SEN030	X			X	X		X	X			X	X		X
SEN026	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
PAEP1														
PROGRES	X	X	X											

3.1.2. Données géophysiques

Dans le cadre des investigations, les travaux géophysiques antérieurs dans la zone du projet ont été répertoriés et dépouillés. Les données proviennent essentiellement des travaux du projet PELT et des mémoires de DEA soutenus à l'UCAD. L'objectif de ces investigations géophysiques visait à définir la géométrie de l'aquifère et plus particulièrement le mur de l'aquifère superficiel des sables quaternaires, mais également d'identifier la position du biseau salé suivant un certain nombre de transects.

Les données du projet PELT (2007) qui portaient sur 6 profils dont 4 dans la zone du projet sont très intéressantes pour les besoins de cette présente étude, du fait qu'elles visaient à définir et à cartographier la morphologie du biseau dans les secteurs de Mboro, Kebemer, Léona et Rao. La carte (figure 11) ci-après présente la position des profils P1 à P4 réalisés de même que la localisation des investigations antérieures.

Les études menées par **Diouf (1995)** considèrent également les données des campagnes de la CPGF (1983) et du BRGM (1987) dans les zones Nord, Sud et le long du littoral pour identifier la morphologie et l'extension du biseau salé. Ces prospections géophysiques comme pour toutes les autres utilisent la méthode géoélectrique qui est bien appropriée pour ce type d'investigation. La figure 12 ci-après montre les profils réalisés.

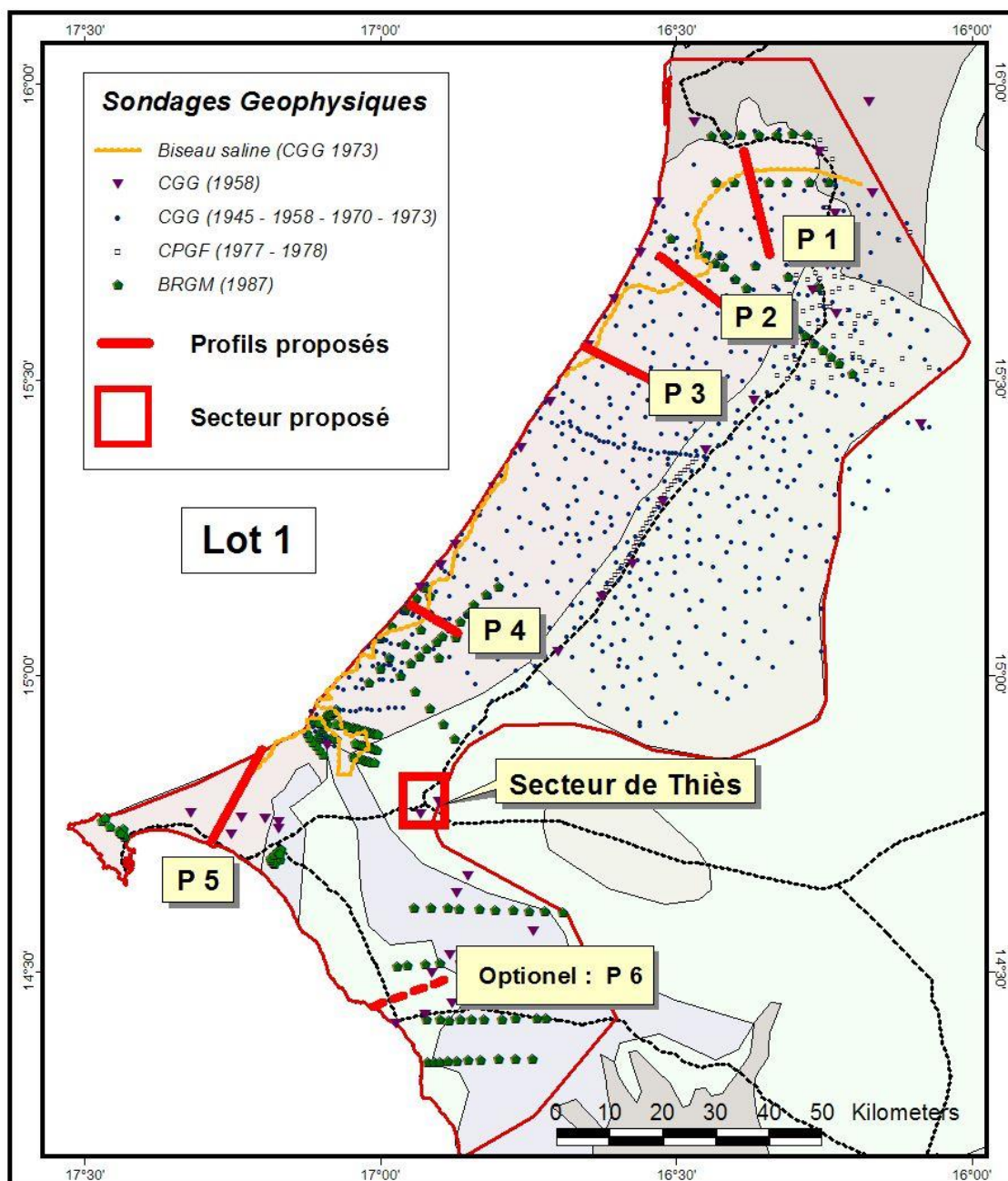


Figure 11 : localisation des études géophysiques antérieures et celles du PELT

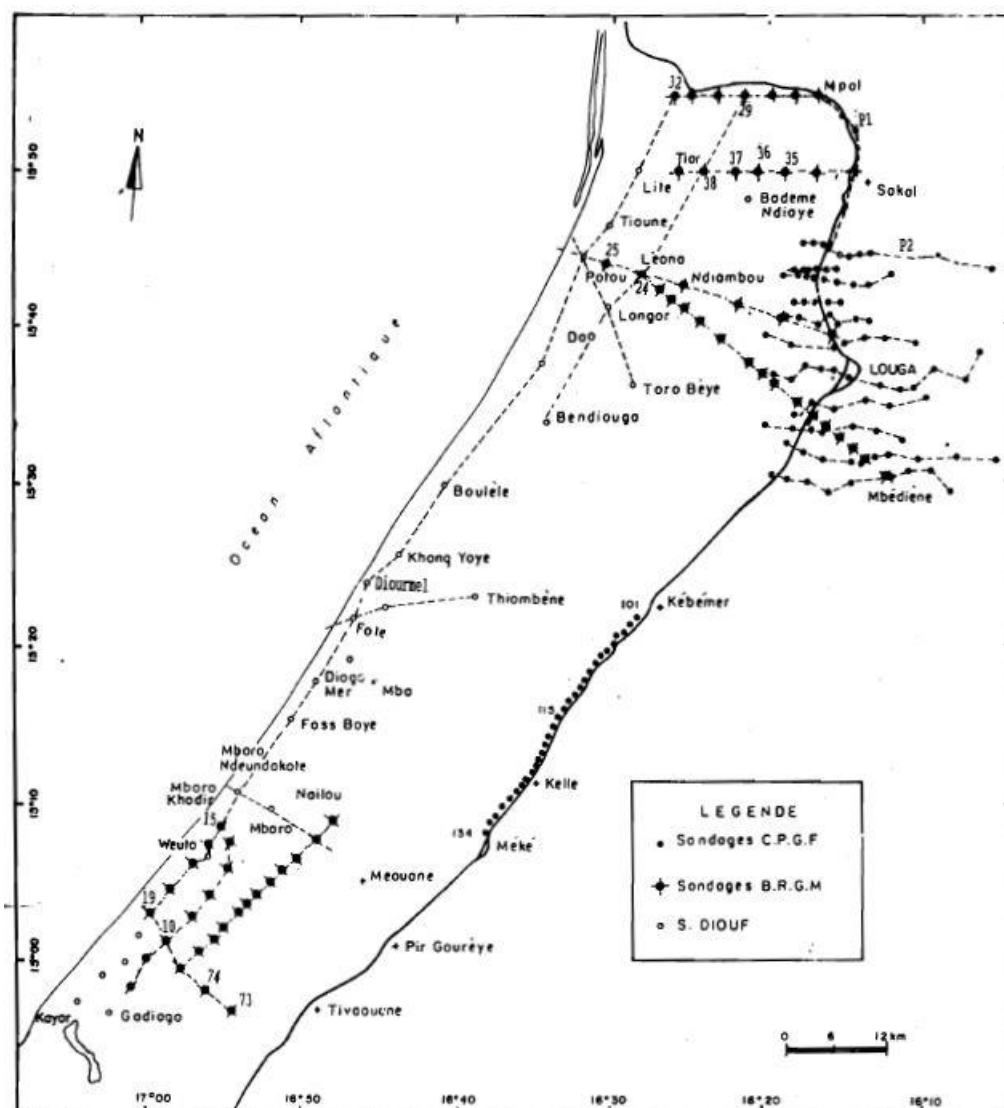


Figure 12 : localisation des profils géophysiques réalisés par Diouf (1995)

3.1.2. Données géométriques de l'aquifère

Ces données proviennent essentiellement des études antérieures de **Diouf (1995)** et de PELT. Elles concernent la morphologie du substratum de l'aquifère qui a été identifiée par l'analyse des sondages électriques (géophysiques) et des sondages mécaniques (forages et piézomètres) et la morphologie de la surface du sol défini à partir d'un SRTM (figure 13 et 14).

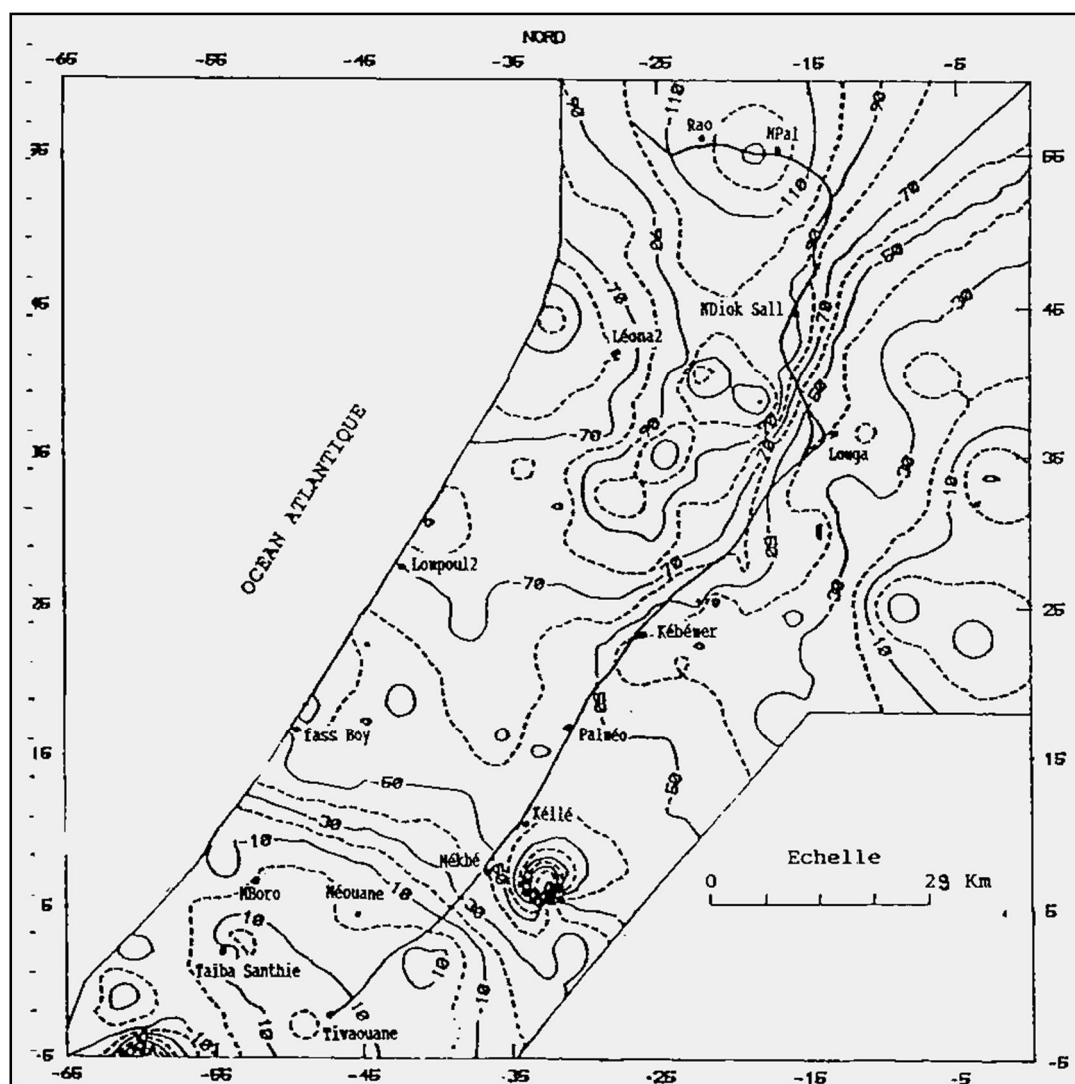


Figure 13 : morphologie du mur de l'aquifère des sables et calcaires

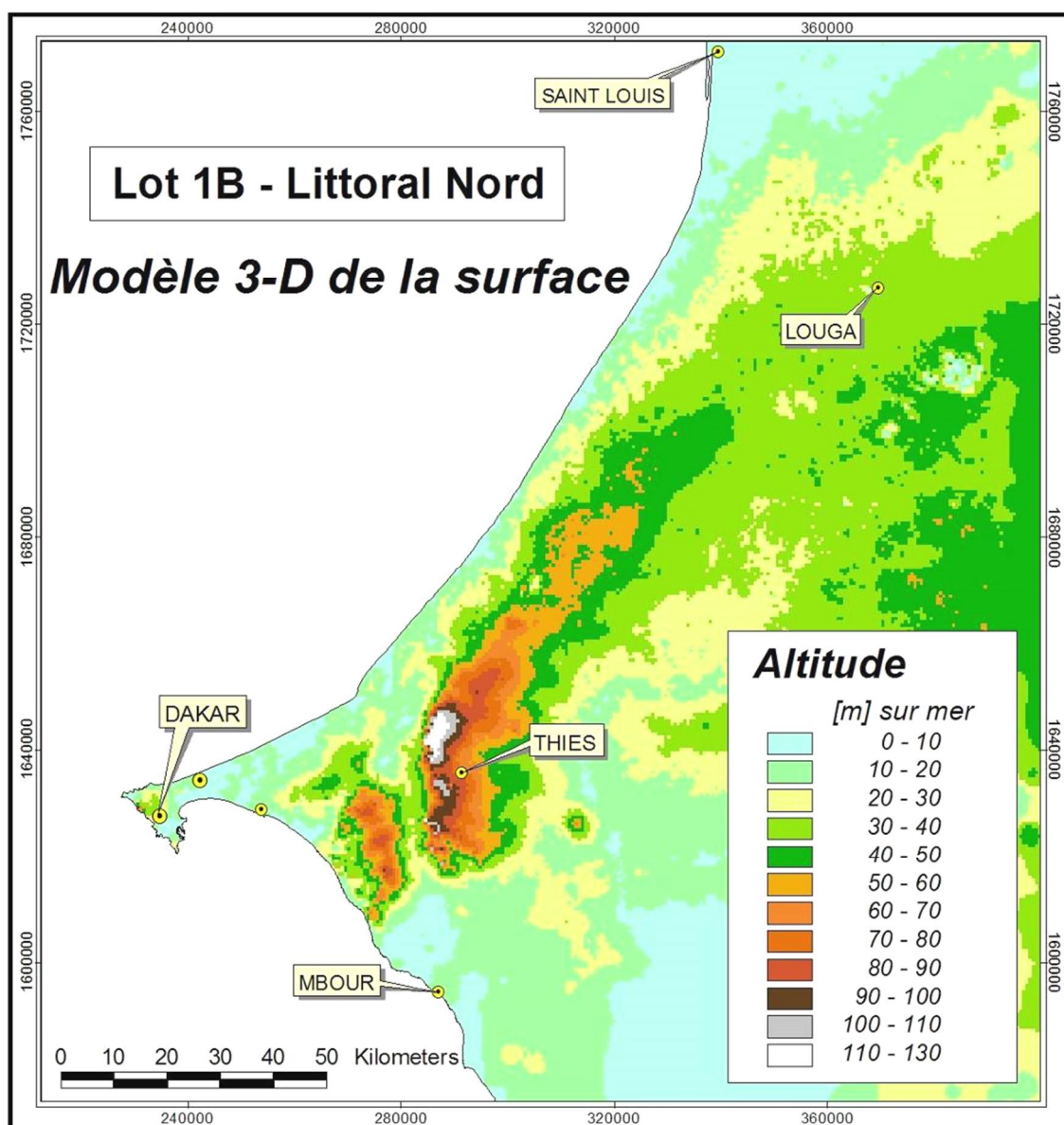


Figure 14 : morphologie de la surface du sol

3.1.4. Données cartographiques

Elles sont relatives aux cartes de répartition des aquifères et piézométriques (GCO) établies sur un réseau très dense de points nivelés. Cette dernière est très représentative de l'écoulement actuel du système. Elle a été réactualisée pour l'analyse de la vulnérabilité.

3.2. Méthodes de traitement des données

Deux méthodes ont été principalement utilisées dans le cadre de ce travail :

- Un Traitement graphique pour représenter l'évolution des niveaux statiques en réponse aux effets de la variation pluviométrique et des pompages effectués sur le système et ;
- Un Traitement cartographique pour représenter le régime d'écoulement du système (piézométrie), la distribution des valeurs de CE permettant de caractériser l'intrusion saline et la carte de vulnérabilité.

3.3. Méthodes d'analyse de l'intrusion saline

Elle est essentiellement basée sur les résultats de la géophysique électrique qui demeure un puissant outil pour identifier la morphologie et l'extension du biseau salé, mais également sur l'application de l'équation Ghyben-Herzberg où la profondeur z de l'interface eau douce/eau salée est exprimée par la relation :

$$Z = (\rho_d / \rho_s - \rho_d) * h$$

Z = profondeur de l'interface

ρ_d = densité de l'eau douce (1g/cm^3)

ρ_s = densité de l'eau salée ($1,02\text{g/cm}^3$)

L'application numérique de cette équation donne en d'autres termes :

$$z = 40 * h$$

Pour une valeur de charge piézométrique de 1m, la profondeur de l'interface est de 40m.

Toutefois, cette relation simplifiée ne traduit pas en effet la réalité puisque la zone de transition qui matérialise l'intrusion est régie par des phénomènes de diffusion moléculaire et de dispersion montrant ainsi un gradient de concentration de sel (Figure 15).

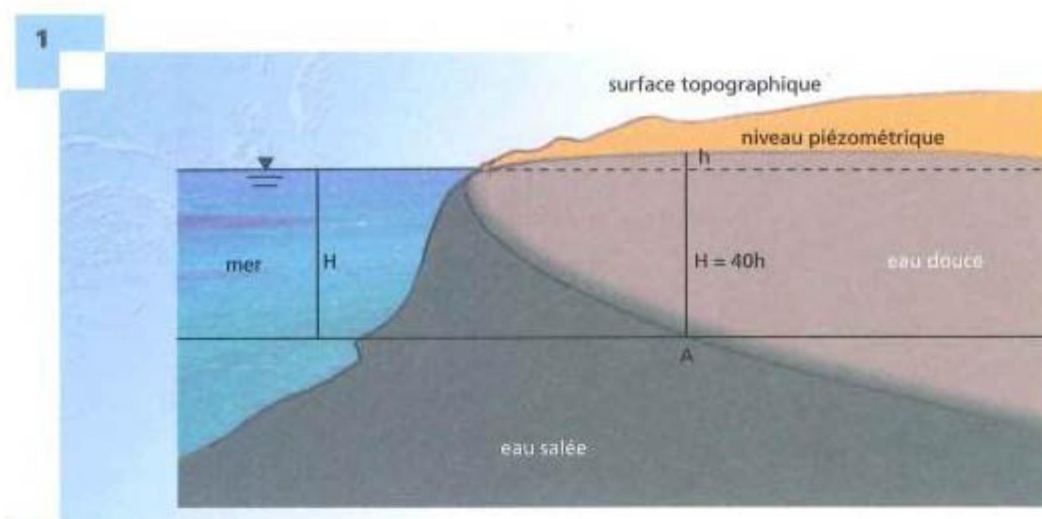


Figure 15 : morphologie de l'intrusion saline d'après Ghyben-Herzberg

4. Résultats

L'analyse des données antérieures et celles recueillies dans le cadre de projet vise essentiellement à établir le comportement de la nappe vis à vis de l'intrusion. Dans cette analyse, nous avons plutôt privilégié les données présentant une longue chronique et celles dont la couverture géophysique est plus étendue. Ci-après, les résultats sont décrits par référence aux données thématiques.

4.1. Situation actuelle de la piézométrie et de la chimie

L'hydrodynamisme de la nappe du littoral Nord a fait l'objet de nombreuses études par modèles (OMS, 1975 ; BRGM, 1986 ; Faye, 1995 ; GKW, 2001) pour évaluer les potentiels exploitables de cette importante ressource utilisée pour l'AEP, les maraichères et l'industrie extractive dans la zone. Les données de suivi tirées des différentes sources (DGPPE, PADEN) sont très fragmentaires et ne

concernent pas tous les ouvrages pour pouvoir générer une piézométrie représentative de l'état actualisé de la nappe. Les études menées par GCO (2012) dans le cadre de l'exploitation de la mine de Zircon se révèlent les complètes puisqu'elles intègrent aussi bien les ouvrages de la DGPRE et aux ouvrages implantés par GCO dans le cadre de leur programme de suivi. La carte réactualisée ci-après (Figure 16 et les cartes par zones sont présentées en annexes) présente la configuration piézométrique qui présente la même morphologie que celles réalisées par BRGM (1987), Faye (1995) et GKW (2001). Elle traduit l'écoulement de la nappe à partir du dôme piézométrique +23m (localisé au Sud) vers l'Ouest suivant un fort gradient jusqu'à la latitude Léona-Louga, vers l'Est suivant un fort gradient qui diminue dans l'aquifère des calcaires éocènes et vers le Nord. Dans la zone Nord, un petit dôme circonscrit à +5m, se matérialise à la latitude de Louga et se dissipe suivant une pente hydraulique relativement faible, vers Saint Louis et vers la côte.

Cette configuration piézométrique qui traduit des pressions de charges hydrauliques joue un rôle très important dans la progression du biseau salé. En effet, sur la frange côtière, les forts gradients hydrauliques et les valeurs de charges hydrauliques de 1 à 2m ont pour effet de repousser l'interface eau douce/eau salée vers la mer, traduisant ainsi une très faible progression du biseau du Sud vers le Nord jusqu'à la latitude de Kébemer. Dans cette zone, on observe un couloir à très faible gradient hydraulique de 0 à 1m qui peuvent induire une forte vulnérabilité de la nappe vis-à-vis de l'intrusion saline. En effet, dans cette dernière zone, du fait de l'équilibre de pression, entre la charge hydraulique proche de zéro et le niveau de référence de la mer (0m), l'interface eau douce/eau salée tend à se déplacer en profondeur vers le continent. Le dôme circonscrit à 4m, localisé à la latitude de Louga représente une lentille d'eau sous l'interface eau douce/eau salée qui serait plus profond dans cette zone. Au-delà, les faibles valeurs de charges hydrauliques de 1m à des côtes en dessous du niveau de la mer seraient la zone la plus affectée par la progression du biseau salé.

Du point de vue chimique, les chroniques de données sur la conductivité électrique prises suivant un pas de temps moyen de 10 ans (1983, 1993, 2003 et 2016) (figure 17), montre bien l'occurrence et la progression de la salinisation de la zone Nord (de piézométrie plate) qui tend à gagner le Sud (Mboro). Dans ce dernier secteur, le soulèvement du substratum marneux (mur de l'aquifère) à -10m,

associé à l'occurrence de la grande Niayes de Mboro serait la cause de la vulnérabilité de la nappe.

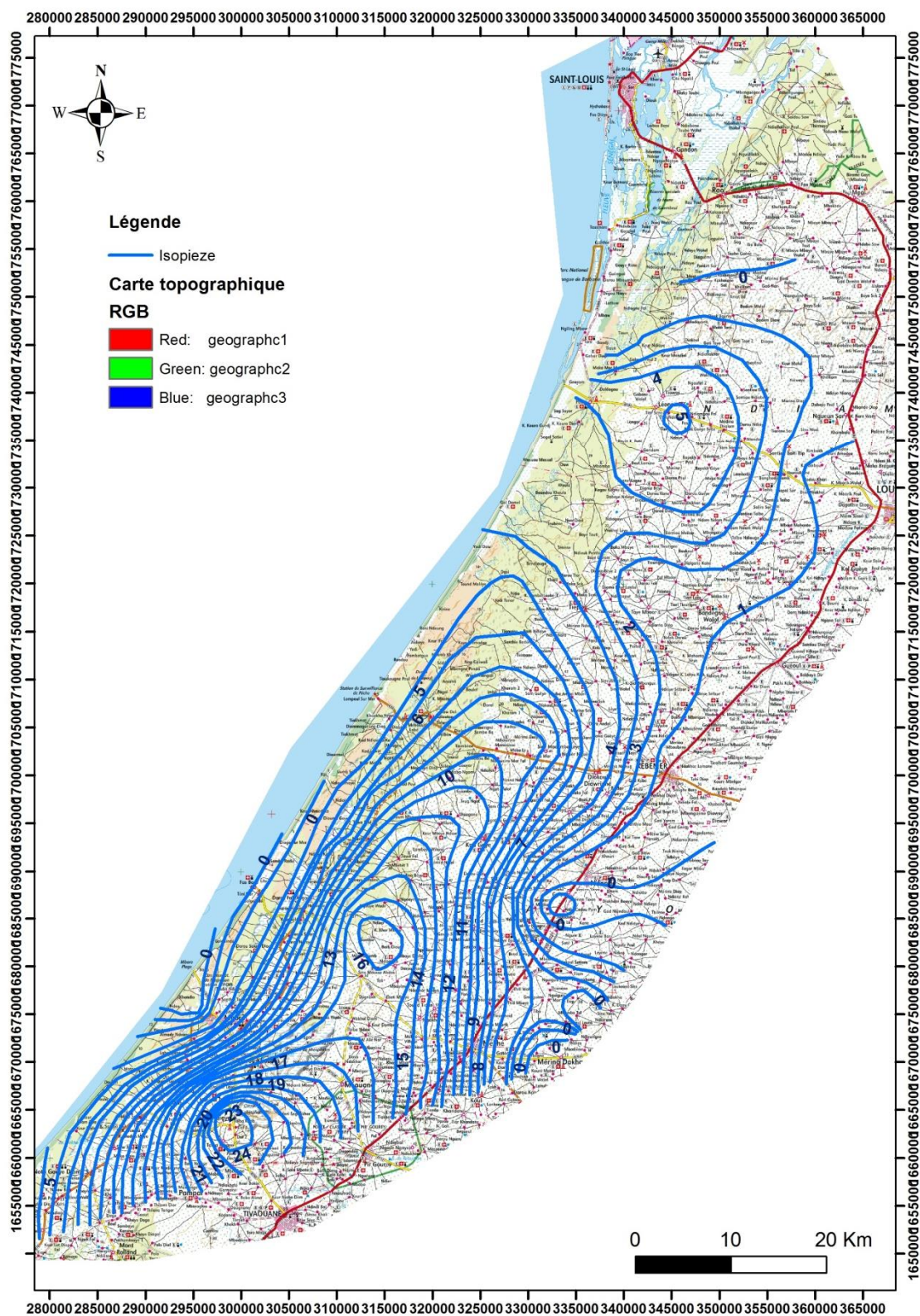
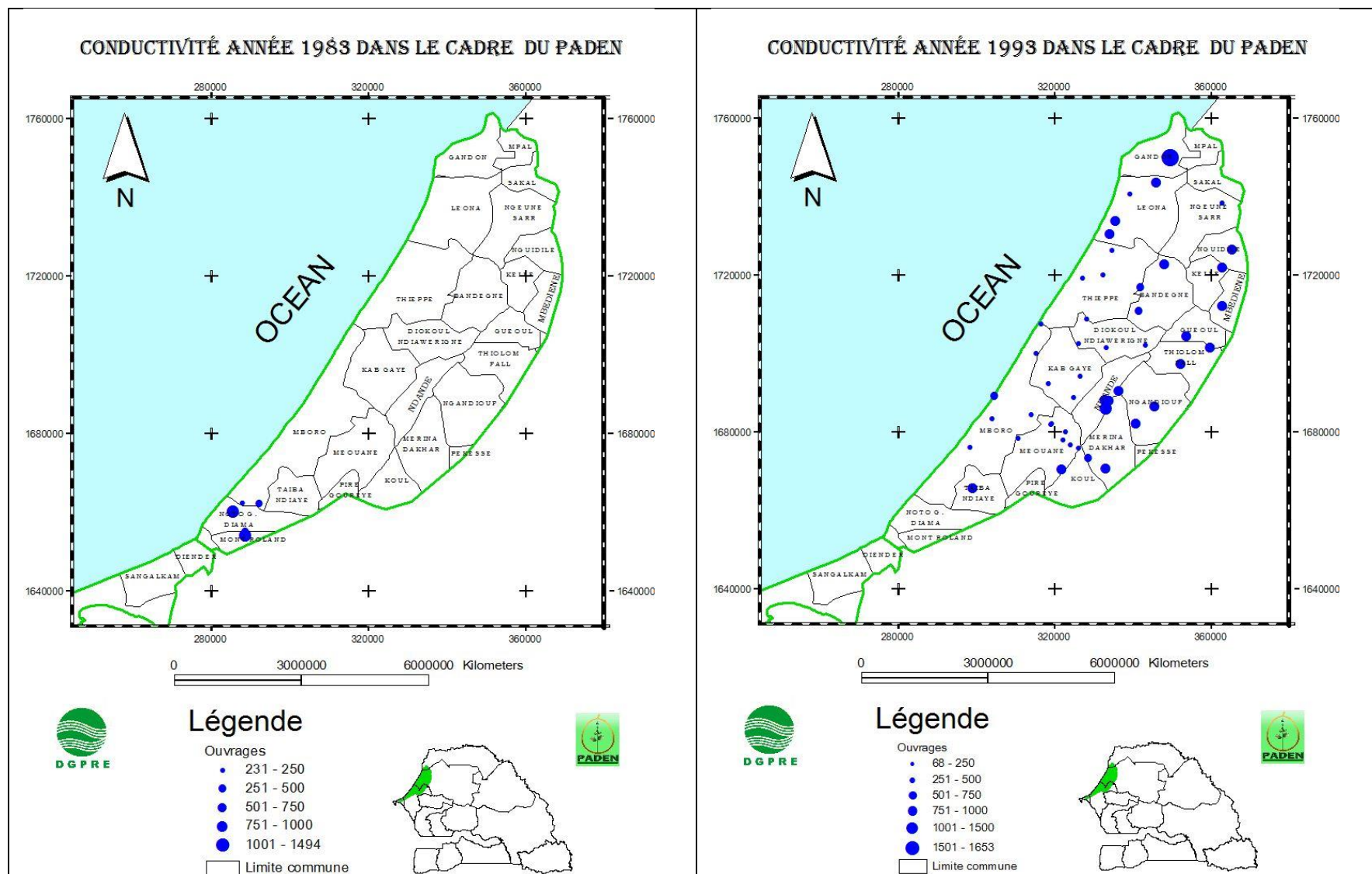


Figure 16 : Configuration actualisée de l'écoulement du système



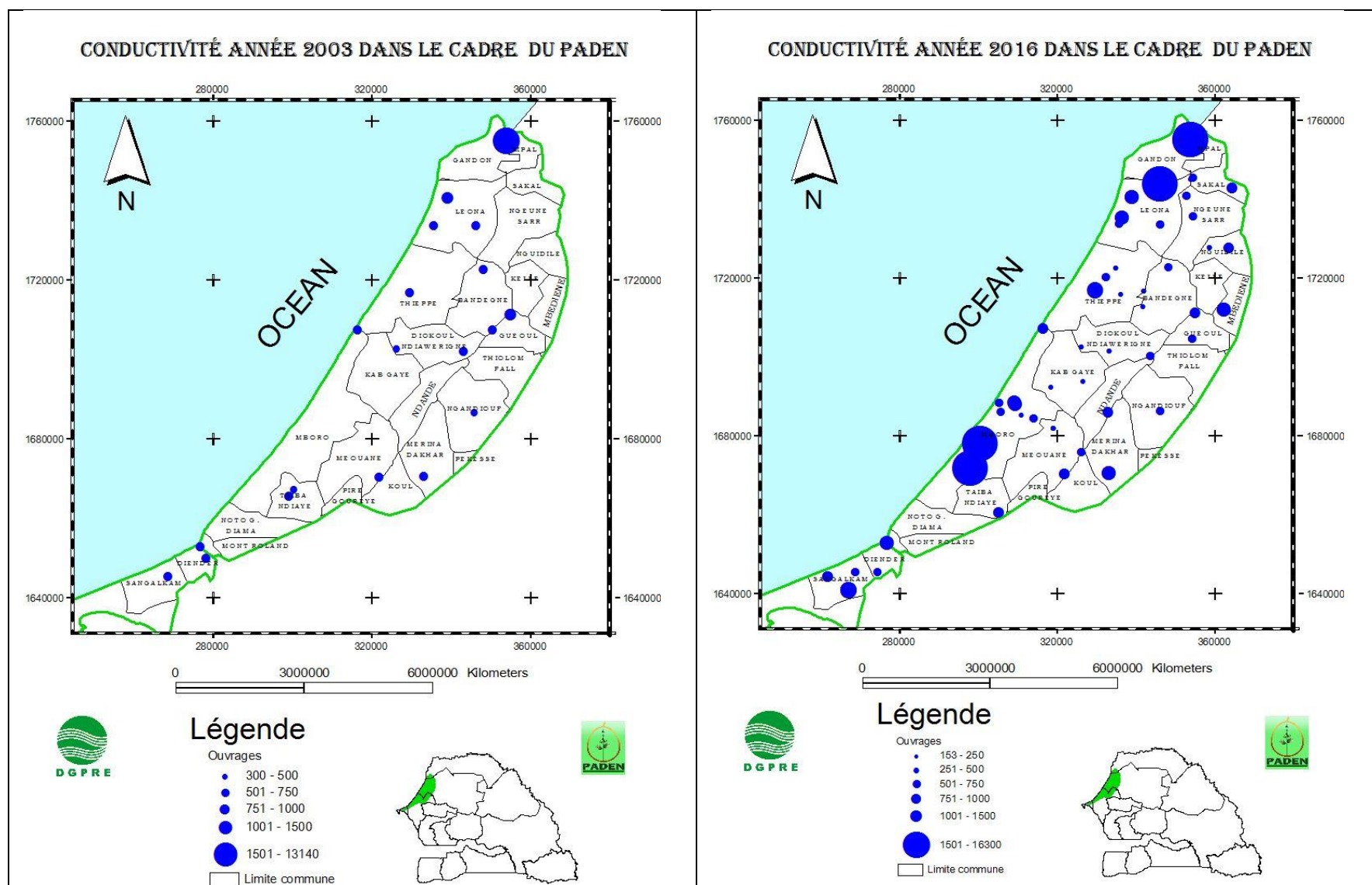


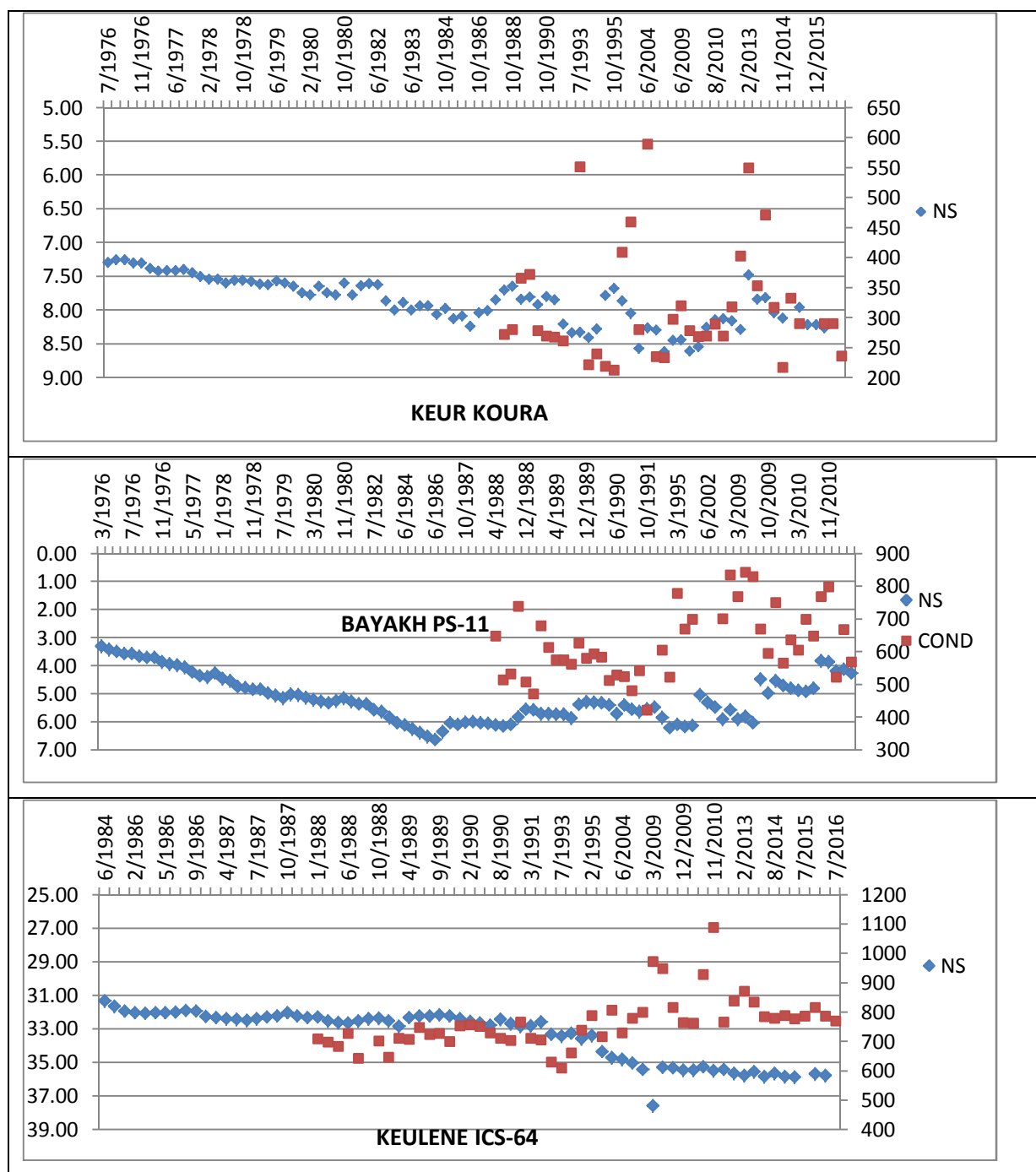
Figure 17 : cartes distribution de la conductivité électrique a différentes dates (1983, 1993, 2003 et 2016)

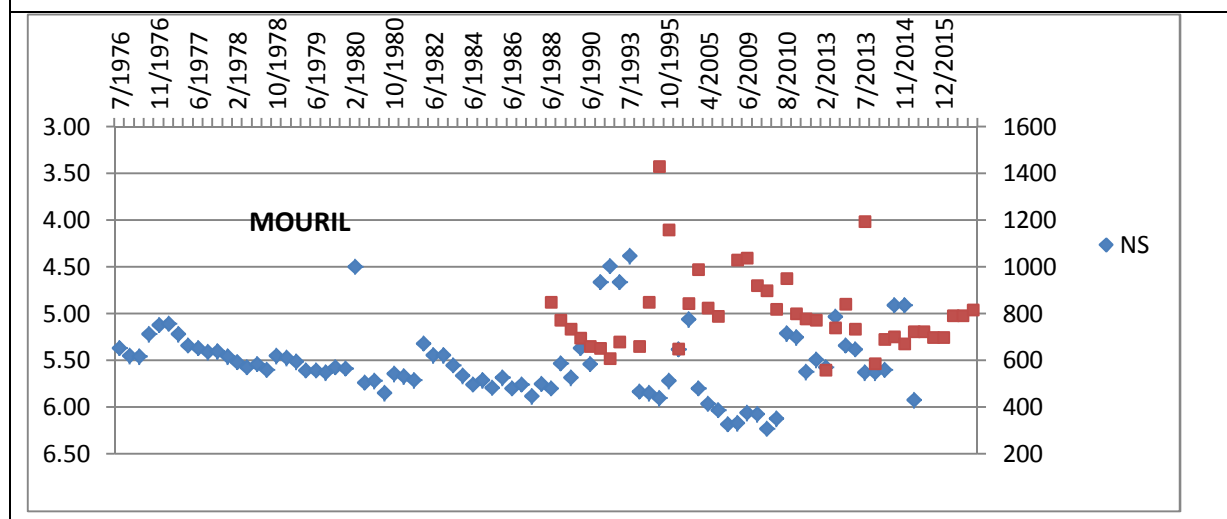
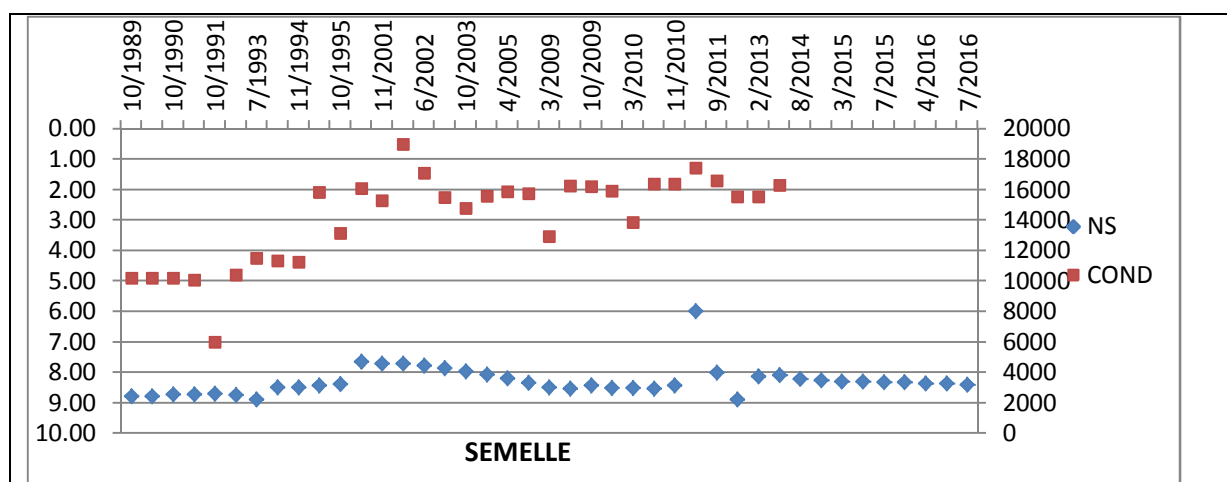
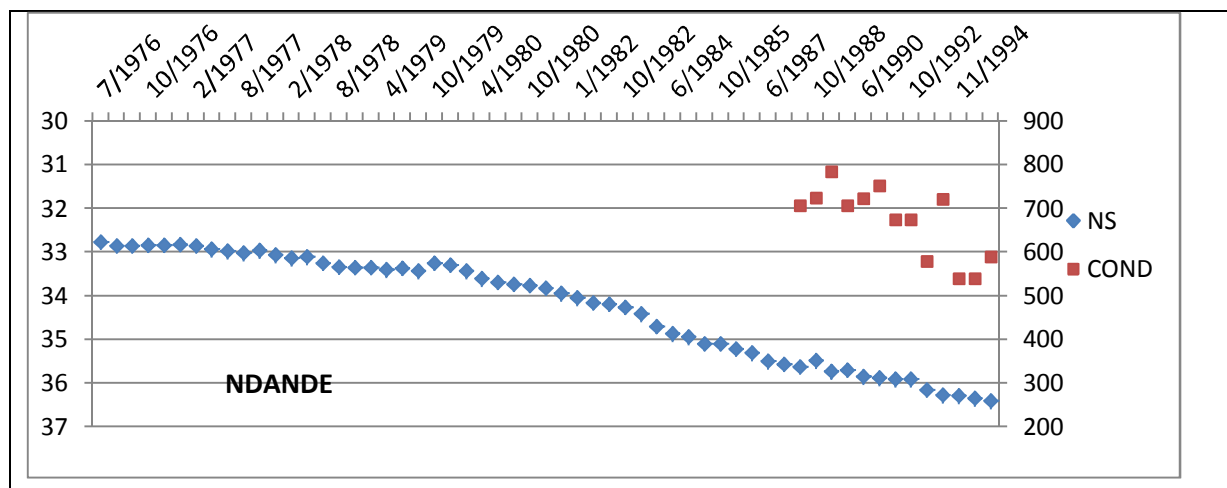
4.2. Analyse des chroniques de données

Ces chroniques ont été constituées à partir des diverses bases des données (PROGRES, PADEN, SEN026, SEN030, PAEP) et réarrangées selon les périodes de collecte des données. Elles ont été utilisées dans le cadre de ce travail pour évaluer l'impact de la dynamique du niveau statique sur la qualité de la nappe. Dans ce qui suit, nous allons décrire et ne présenter que les données des ouvrages montrant les signes de contamination saline et qui sont pertinentes pour l'étude. Les autres courbes sont présentées en annexes du présent document.

L'analyse des tendances montre bien une baisse continue du niveau statique de la nappe sur des amplitudes variées. Toutefois, certaines de ces courbes montrent bien une variation saisonnière induite par la recharge directe par les eaux de pluie. L'allure des courbes traduit aussi bien l'impact de la baisse des pluies mais surtout les effets des prélèvements qui peuvent être très importantes dans certaines zones. C'est le cas des piézomètres de Keur Koura, Bayakh, Keuleun, Ndande (Figure 18). L'effet des baisses se traduit surtout au niveau des ouvrages proches du littoral où les valeurs de CE augmentent de plus de 1000µs/cm comme à Semelle, Mouril, Thioucougne, Ndiop Sao et Pétie. Par contre les ouvrages localisés à l'intérieur du continent sont des variations de minéralisations dans la gamme des eaux douces.

En définitive, cette tendance à la baisse du niveau de la nappe observée dans presque tous les ouvrages des puits et piézomètres traduit bien l'état du régime transitoire du système qui subit aussi bien l'impact des variations climatiques (diminution de la recharge), que des forts prélèvements dans la nappe. Cette baisse généralisée qui traduit une diminution des charges hydrauliques du système a pour conséquence une progression de l'interface eau douce/eau salée vers le continent. Mais il faut toutefois souligner que ce phénomène est un processus très lent et l'impact réel ne pourra être vu que si la nappe subit une forte pression au niveau de la frange littorale où les valeurs de charges hydrauliques proches du zéro de la mer.





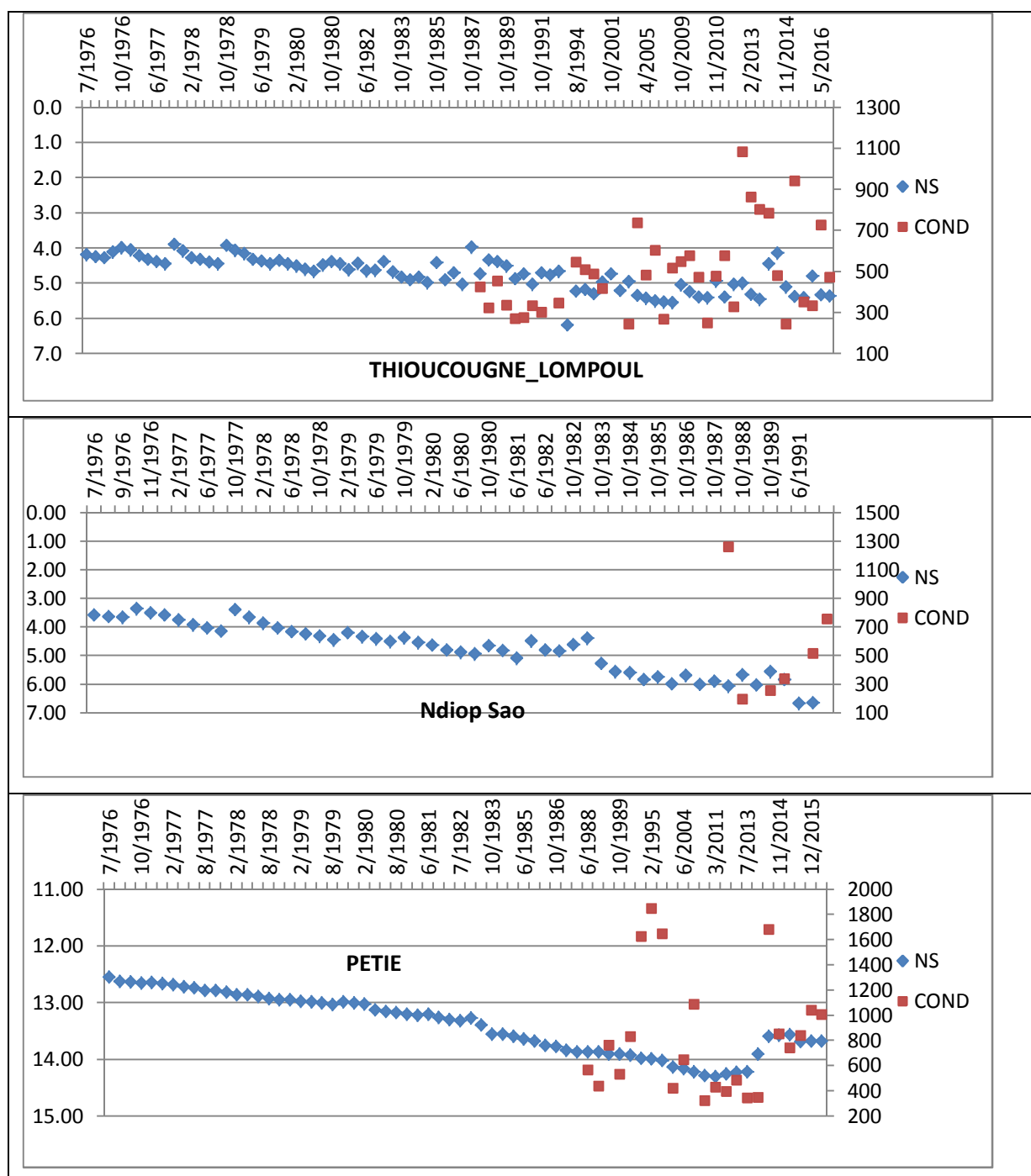


Figure 18 : tendance évolutive du niveau statique et de conductivité électrique au niveau de quelques ouvrages

4.3. Etudes géophysiques

Les études géophysiques antérieures obtenues dans le cadre des campagnes de CGG (1945, 1958, 1970, 1973), CPGF (1977, 1978), BRGM (1987), Diouf (1995) et PELT (2007, Antea) visaient essentiellement deux objectifs :

- La définition de la morphologie de la géométrie du système aquifère du littoral Nord (sables quaternaires et calcaires littoraux),
- L'identification de la morphologie et l'extension du biseau salé.

Les campagnes CGG de 1945, 1958, 1970 et 1973 permis de délimiter l'extension du biseau salé (1973) le long du littoral Nord depuis le lac Retba jusqu'à Saint Louis. Ces résultats ont montré une incursion du niveau des zones du lac Retba, Mboro-Fass Boye, Lompoul, Keur Malaye, Leona-Rao, Mpal.

Les études géophysiques de CPGF (1977) et celles du BRGM (1987) confirment la présence et l'extension du biseau salé à Mpal et sur la frange côtière à Lompoul, Fass Boy et Mboro suivant les transects où la morphologie de l'interface a été bien définie (figure 19). Il faut signaler qu'à Mboro, l'avancée du biseau est plus prononcée. Ceci serait principalement lié à l'altitude du substratum qui est haute mais également à la présence de la grande dépression de la Niaye dans cette zone. Dans la zone Nord à Sakal et Mpal, le biseau salé est très superficiel à des profondeurs d'environ 15m. Dans cette zone, du fait de la charge hydraulique proche du niveau de la mer, la nappe est fortement contaminée par l'avancée du biseau salé. Par contre vers le Sud, entre Mboro et Lompoul, le front salé est détecté sous une faible nappe d'eau douce entre 150 et 250m à l'intérieur des terres. Cette faible distance d'incursion s'explique bien par la morphologie de l'interface qui se présente sous une pente raide du fait de l'effet des charges hydrauliques de la nappe.

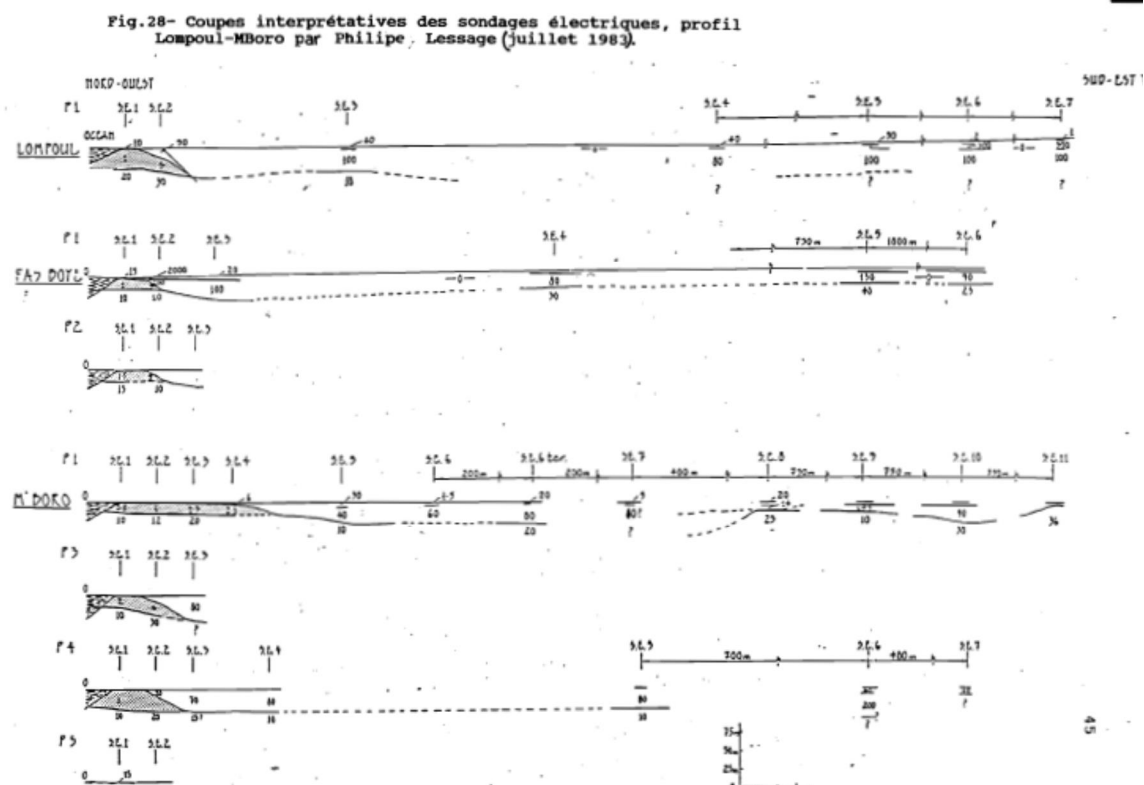


Figure 19 : position du biseau sale en 1973 a Mboro, Fass Boy et Lompoul

Les études de **Diouf (1995)** et du PELT (2007) ont repris les travaux antérieurs ci-hauts décrits pour évaluer la progression du biseau salé suivant des transects bien définis. Diouf (1995) à partir de 5 profils géoélectriques a identifié la profondeur du biseau salé dans la zone Nord à 50m du Lite, 75m à Fote, à 25m à Mboro et à moins de 15m à Potou. Dans cette dernière, la morphologie de l'interface est bien marquée où elle plonge à plus de 50m sur la distance de 5km à l'intérieur des terres. Vers l'extérieur Nord par contre, la morphologie de l'interface est relativement plate vers Lite - Thior - Sakal et à Mboro. La coupe interprétative définie par Diouf met en évidence la très forte vulnérabilité du système dans les secteurs Sud et Nord (figure 20) comme l'a défini les études antérieures.

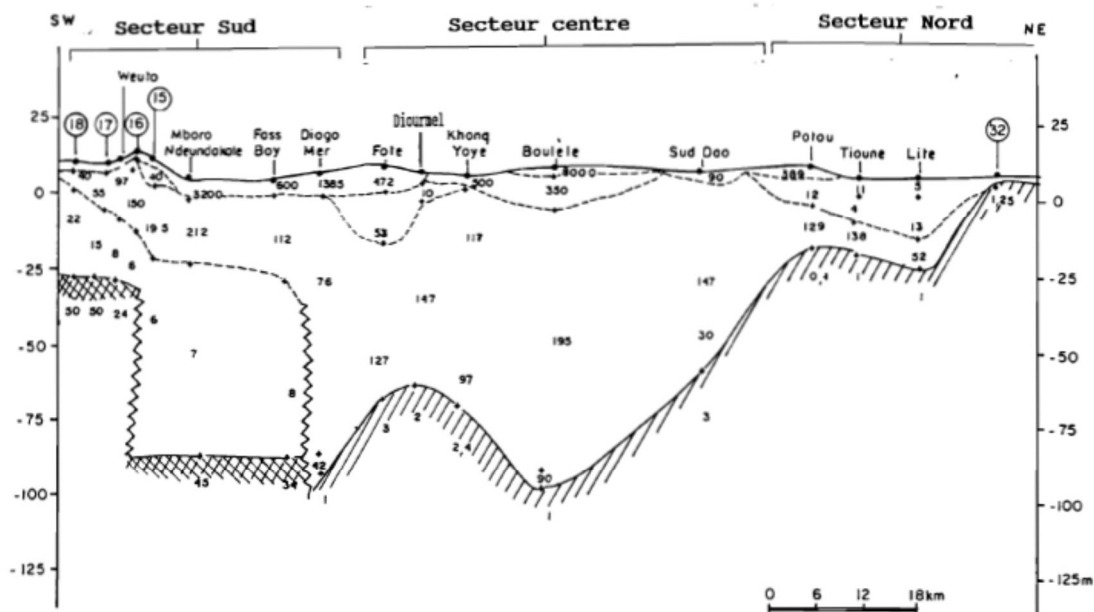


Fig.35- Coupe interprétative de sondages électriques, secteur côtier (Diouf. S, Janvier 1993).

Figure 20 : coupe électrique interprétative de la frange littorale (Diouf, 1995)

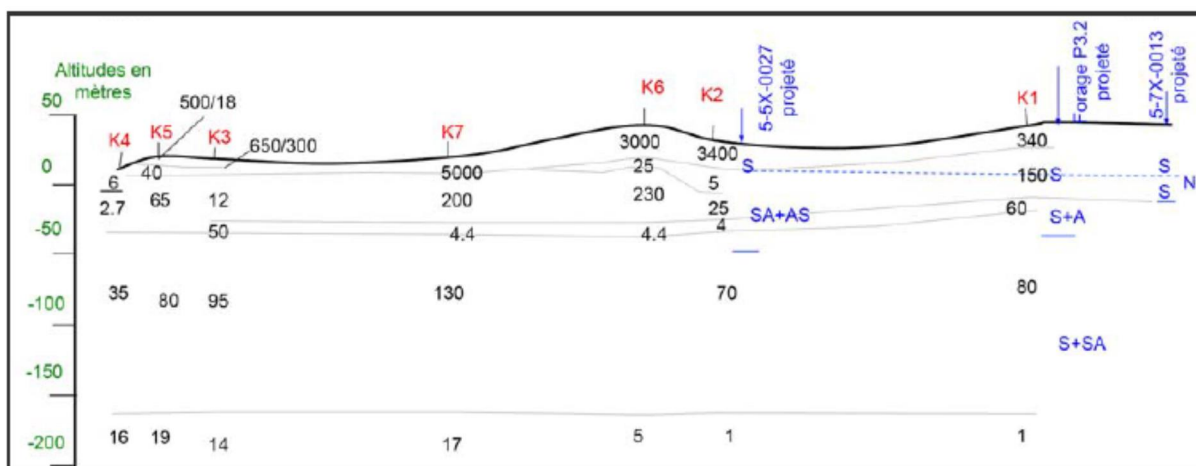
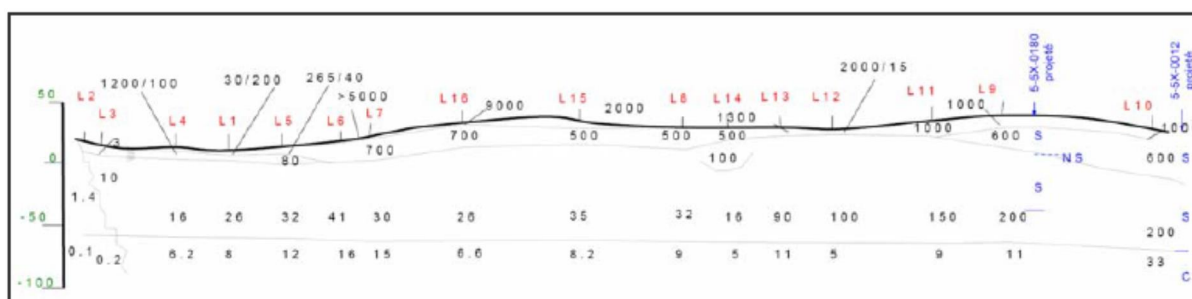
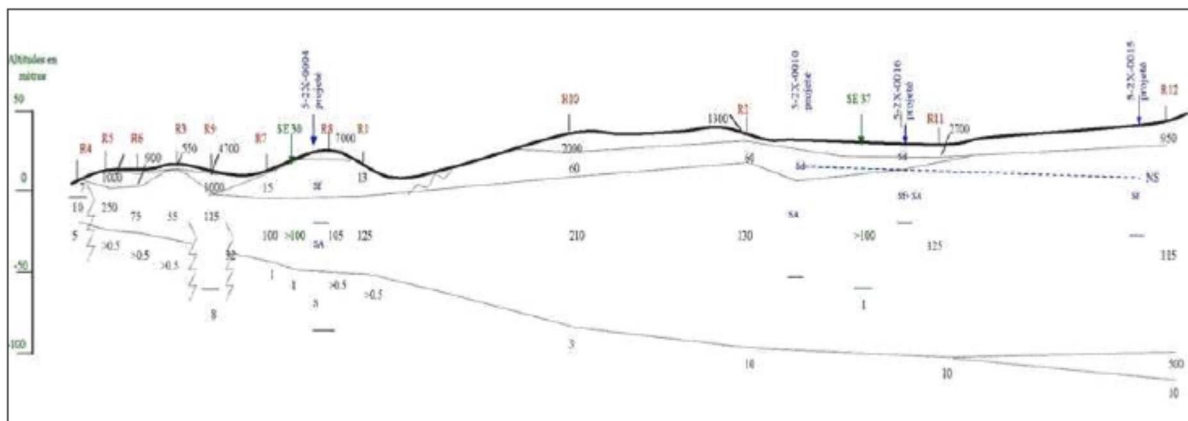
La dernière étude géophysique réalisée dans la zone a été effectuée à partir de 4 profils localisés au niveau du Rao, Léona, Lompoul et Mboro (Figure 21). Elle confirme la présence du biseau salé jusqu'à environ 21km de la côte dans la zone Nord. Dans ce secteur, la géométrie de l'interface se manifeste suivant une pente qui s'enfonce régulièrement au NNW vers le SSE de -20m à 100m. A Léona, l'intrusion est plus restreinte et se fait sentir sur 1,5 à 2km. A Lompoul, elle est également restreinte à 1km de la côte de même que sur le profil de Mboro où elle se limite à 1km environ.

Ces différents résultats géophysiques montrent relativement les mêmes tendances de contamination saline qui se caractérisent grossièrement par :

- Une extension relativement limitée de la zone Sud au centre et une morphologie suivant une pente relativement raide ;
- Une extension plus généralisée dans la zone Nord suivant une pente très douce subhorizontale.

Cette morphologie serait intimement liée à la configuration piézométrique de la nappe où les forts gradients hydrauliques et les valeurs de charge ont tendance à repousser l'intrusion vers l'océan lui conférant ainsi une pente raide par

opposé à la zone Nord où les faibles valeurs de charges hydrauliques négatives permettant une plus grande incursion de l'eau de mer à l'intérieur des terres.



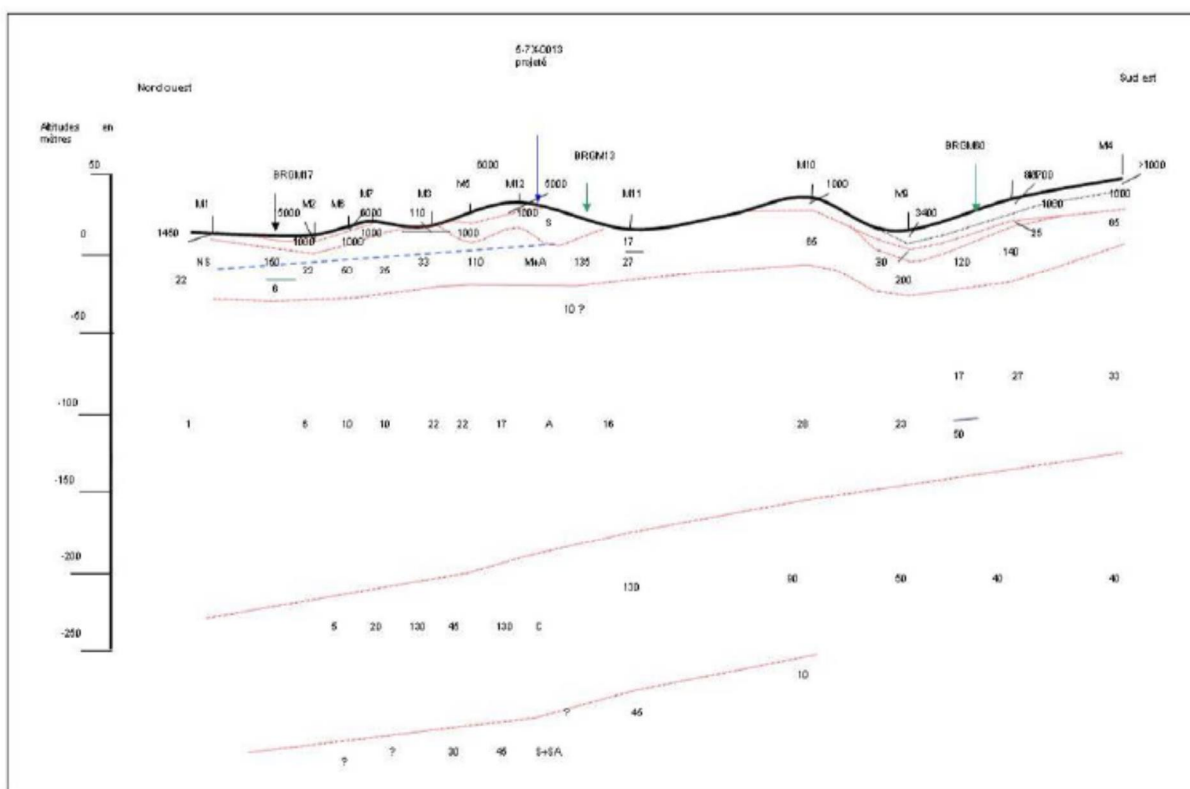


Figure 20 : coupe geoelectrique interpretative à Rao, Leona, Lompoul et Mboro

4.4. Analyse de la vulnérabilité

Comme énoncé plus haut, le mode de salinisation des nappes dépend à la fois des contextes géographiques, géologiques, hydrogéologiques et climatiques. Il découle principalement de phénomènes naturels résultant de la différence des charges entre le zéro de la mer et la charge piézométrie de la nappe, mais également de phénomènes induits comme l'exploitation accrue des nappes et les changements climatiques qui ont pour conséquences respectives une baisse du niveau piézométrique et une élévation du niveau marin. La vulnérabilité peut se définir comme la sensibilité de la nappe vis à vis de l'intrusion ; elle peut être évaluée à partir de deux approches à savoir :

- Une approche multi-critère cartographique
- Une approche par modélisation et simulation de l'intrusion saline.

La première approche prend en compte plusieurs paramètres dont la combinaison linéaire ou la simple superposition ou encore la mise en parallèle permet de définir un profil de vulnérabilité des nappes côtières. Ces paramètres devraient prendre en compte :

- 1) les caractéristiques géomorphologiques et géométriques des aquifères côtiers permettant d'évaluer la sensibilité du système et l'état actuel de contamination
- 2) les caractéristiques des pressions démographiques (forte exploitation) et de densité de captage
- 3) les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe (perméabilité, charges hydrauliques).

Le modèle **GALDIT** (Groundwater, Aaquifer, Level, Depth, Impact, Thickness) développé par Chachadi et Lobo-Ferreira (2001) représente une approche de cartographie à index basée sur la combinaison de 6 paramètres pouvant influencer potentiellement l'intrusion saline. Ces paramètres sont les suivants :

- Le type d'aquifère (libre, captif, semi-captif) "Groundwater occurrence"
- La conductivité hydraulique de l'aquifère "Aaquifer hydraulic conductivity"
- La profondeur de la nappe en dessous du niveau marin "Depth to groundwater Level above sea level"
- La distance par rapport à la côte "Distance from shore"
- L'impact de l'état actuel de l'intrusion saline "Impact of existing status of seawater intrusion"
- L'épaisseur de l'aquifère "Thickness of aquifer"

Les poids qui représentent les paramètres L, D et A sont de loin plus importants vis à vis de la vulnérabilité. Le tableau 4 suivant donne une indication sur le poids de chacun des paramètres impliqués dans l'analyse de la vulnérabilité.

Tableau 4 : Caractéristiques du modèle de GALDIT

	Poids	Très faible	Faible	Moyen	Elevé
Type d'aquifère (G)	1	imperméable	Semi-captif	Captif	Libre
Conductivité hydraulique (m/h) (A)	3	<5	5-10	10-40	>40
Charge hydraulique (m) (L)	4	>2	1,5-2	1-1,5	<1
Distance par rapport au rivage (m) (D)	4	>1000	750-1000	500-750	<500
Etat actuel de la salinisation (I)	1	<1	1-1,5	1,5-2	>2
Epaisseur aquifère (m) (T)	2	<5	5-7,5	7,5-10	>10

Les poids que représentent les paramètres L et D relatifs à la charge hydraulique et à la distance par rapport à la côte sont les plus déterminants dans le cas de notre étude puisque les valeurs de perméabilité de l'aquifère et le type d'aquifère sont relativement homogènes. Nous les utiliserons principalement pour définir et analyser la vulnérabilité du système en procédant par une simple mise en parallèle comme méthode d'évaluation. Dans cette étude, nous avons opté classer les profils de vulnérabilité en 4 classes partant de très vulnérable, vulnérable, moyenne vulnérable et faiblement vulnérable. Les limites adoptées pour les valeurs de charges hydrauliques qui sont 0.5 m et 1m correspondent respectivement à des profondeurs de 20 et 40 m de positions d'interfaces eau douce/eau salée. Nous les avons utilisés pour délimiter les zones très vulnérables des zones vulnérables. Ainsi, les résultats montrent une zonation suivante (Figure 21):

- Une bande de vulnérabilité élevée localisée principalement sur la frange côtière d'extensions inégales selon les zones Sud, centre et Nord ; cette bande est délimitée par la valeur de charge de 0.5m correspondant à une profondeur d'interface de moins de 20m. Dans cette bande, du fait de la faible profondeur de l'interface eau douce/eau salée, des risques très élevés de progression du biseau sont évidents si des captages par forages sont autorisés. Dans le cas d'une exploitation à partir d'ouvrages motorisés, son

impact pourrait se faire soit une avancée latérale vers l'intérieur des terres soit par des phénomènes de remontée de l'interface appelés upconing. Toutefois, le puisage à partir de puits traditionnels pourrait s'opérer si la tranche supérieure de la nappe est à eau douce.

- Une zone vulnérable délimitée par le tracé des charges hydrauliques comprises entre 0.5 à 1 m qui est contigüe à la bande de vulnérabilité très élevée. Dans cette zone, l'interface devrait se situer entre les profondeurs comprises entre 20 et 40m. Elle présente également une extension inégale selon les zones Nord, centre et Sud de la région. Dans cette zone, les ouvrages motorisés ne devraient pas être autorisés comme c'est le cas pour la zone très vulnérable ;
- Une zone de vulnérabilité moyenne correspondant à la zone où les valeurs de charges hydrauliques sont comprises entre 1 et 2 m (profondeur d'interface entre 40 et 80m. Dans cette zone, des ouvrages motorisés à faible -moyen débit pourraient être autorisés vers l'amont tout en surveillant l'évolution de la salinité de la nappe ;
- Une zone faiblement vulnérable vis-à-vis l'intrusion saline qui s'étend vers l'intérieur des terres.

En plus de ces zones à vulnérabilité graduelle, des zones sensibles ayant un impact sur la baisse du niveau de la nappe dans sa frange côtière sont également identifiées ; il s'agit des zones de dômes piézométriques localisées au Sud et au Nord de la région qui contrôlent l'écoulement du système. Ces zones devraient être bien surveillées et préservées pour éviter toute baisse importante de charges hydrauliques qui auraient une conséquence sur la relation hydrodynamique entre nappe/eau de mer.

En prenant en compte le paramètre D de 1km qui est la distance par rapport au rivage et son poids sur l'évaluation de la vulnérabilité, on voit bien que ce paramètre influence peu le modèle de vulnérabilité développé. Cette limite classée comme faiblement vulnérable dans la classification GALDIT chevauche dans la classe des vulnérabilités très élevées à élevées. C'est pourquoi nous l'avons dressée dans les cartes de vulnérabilité uniquement à titre indicatif.

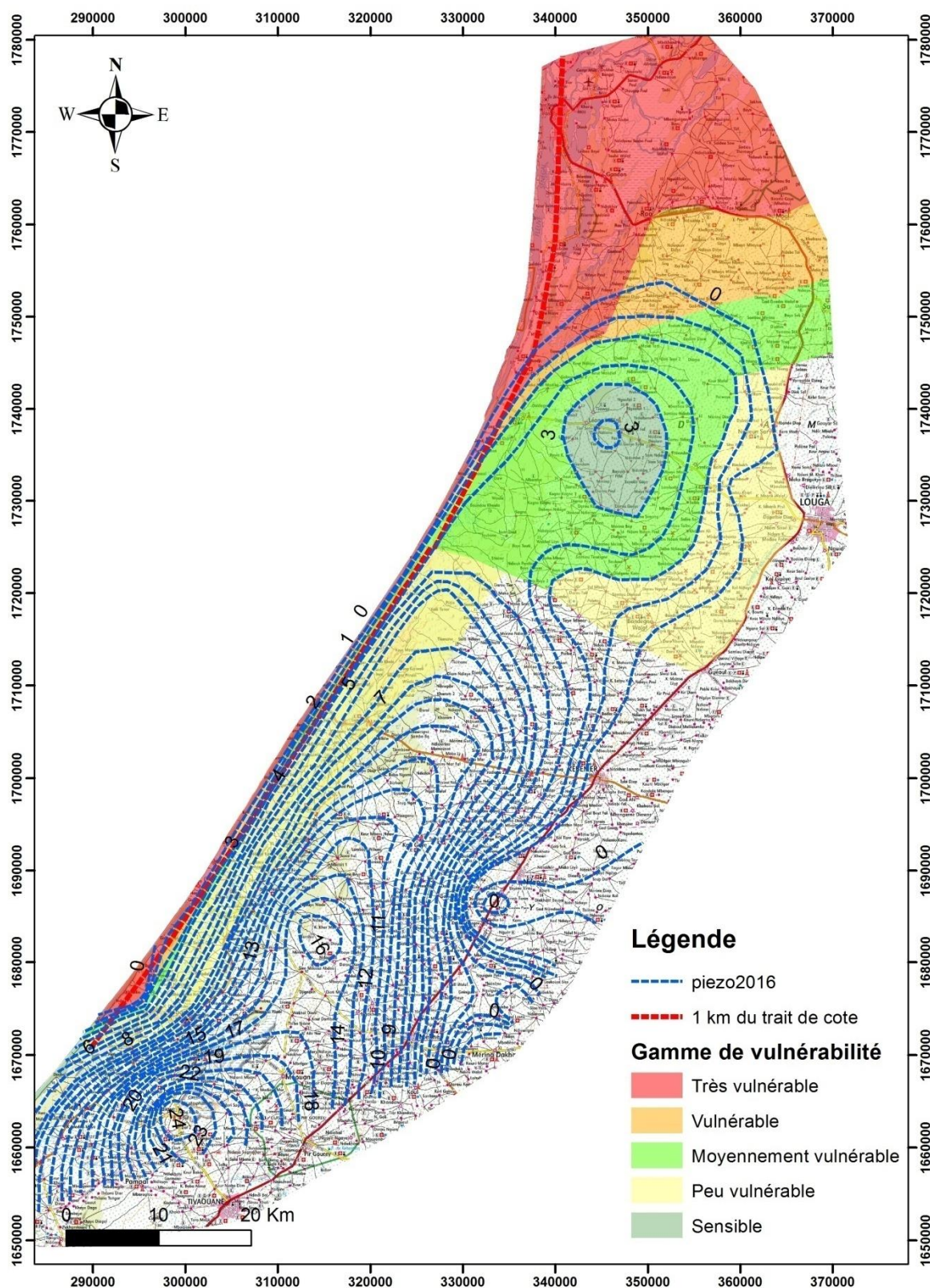


Figure 21 : carte de vulnérabilité établie à partir de l'analyse

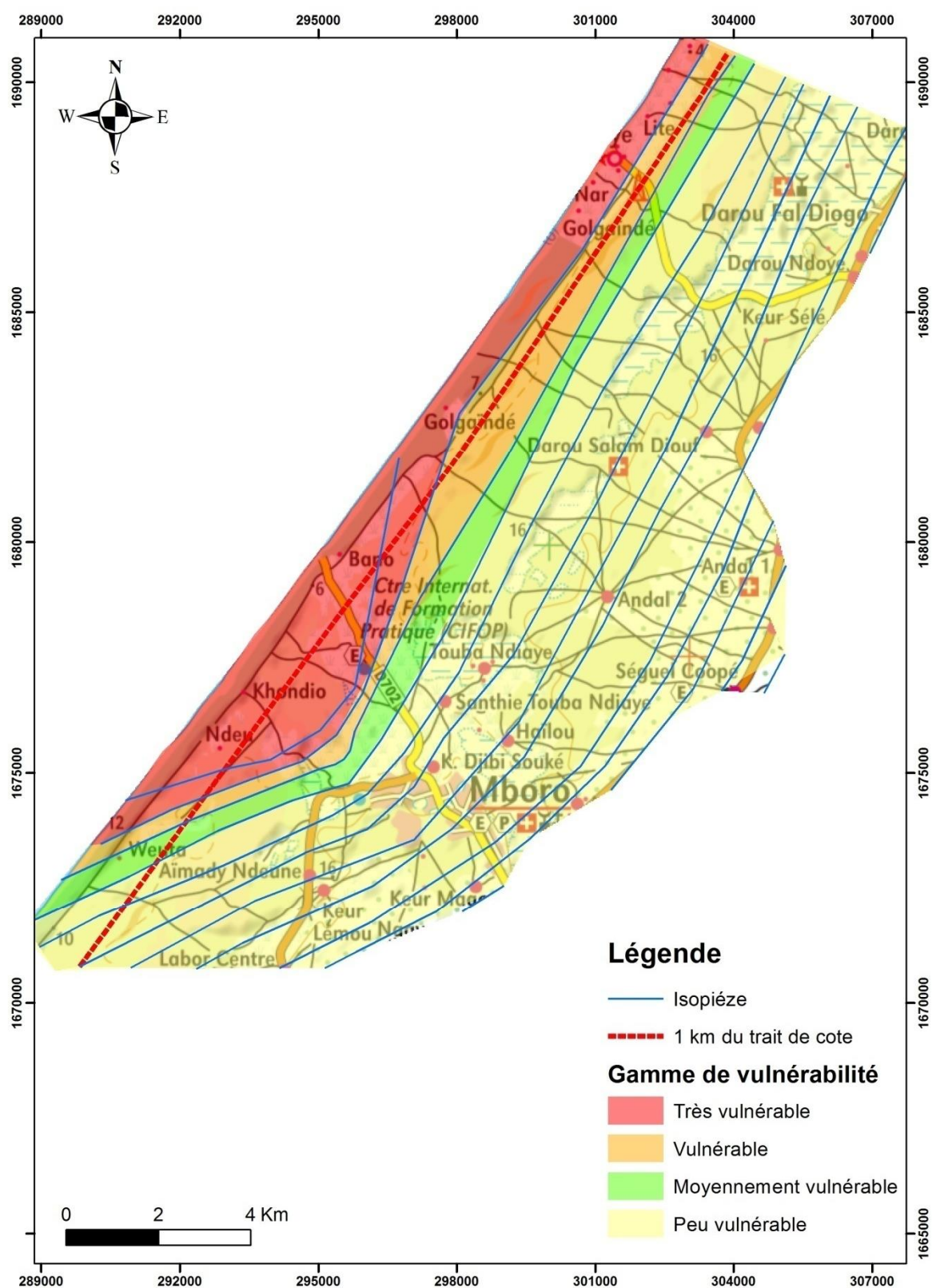


Figure 21a : carte de vulnérabilité de la zone sud

Rapport final-cartographie de la vulnérabilité de la Zone des Niayes-PADEN

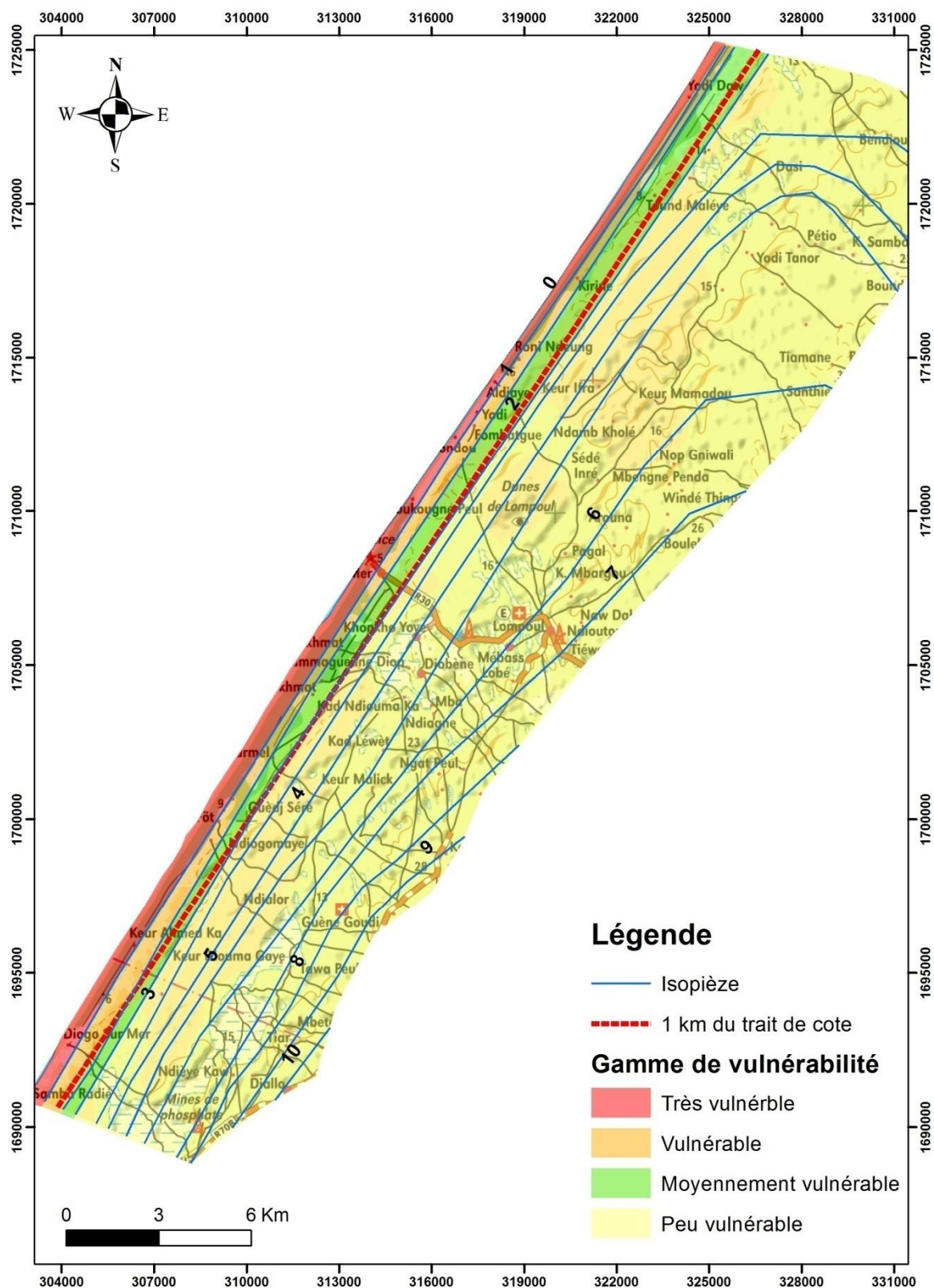


Figure 21b : carte de vulnérabilité de la zone sud

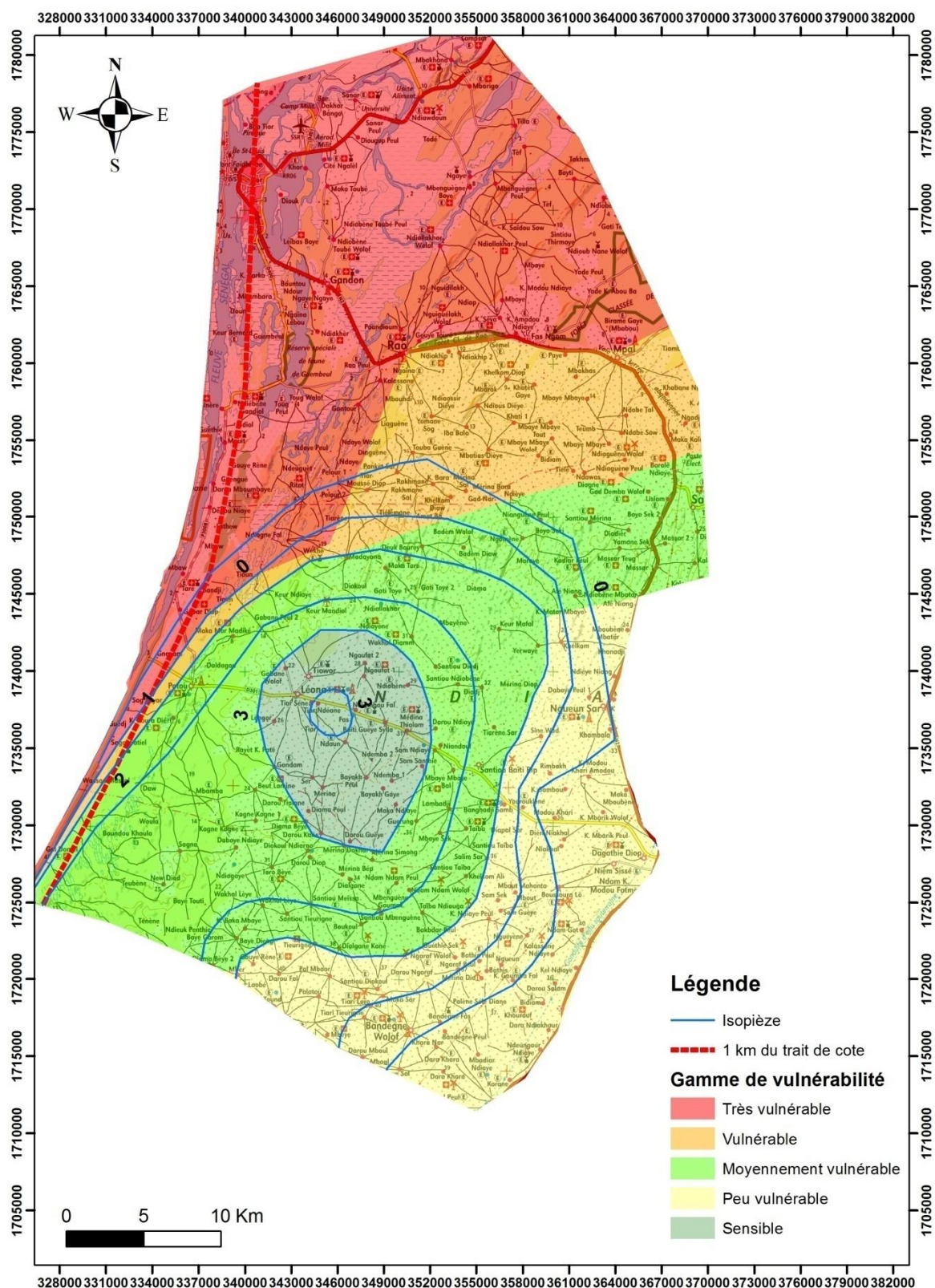


Figure 21c : carte de vulnérabilité de la zone nord

5. Orientations stratégiques

5.1. Cadrage - Objectifs

La nappe phréatique du littoral Nord constitue un réservoir important d'eau douce. Elle constitue une ressource stratégique pour le développement de l'activité maraîchère mais également de l'industrie extractive qui prend un essor considérable dans la zone du projet. Cette nappe contribue également pour une grande partie à l'AEP des populations de la zone et à l'AEP des centres urbains dont Dakar. D'un autre côté, elle est au cœur de l'équilibre de l'écosystème des Niayes et des zones humides en raison des relations étroites entre les eaux souterraines et les zones humides des bas-fonds.

En définitive, du fait de leur capital précieux pour le développement socio-économique de la région et même du pays, cette ressource demeure tout de même vulnérable face aux processus naturels (intrusion saline) comme aux effets anthropiques (pompages, pollutions, recharges induites) et sa protection devient plus qu'une nécessité. Sa préservation passe nécessairement par l'amélioration de nos connaissances sur le système et son fonctionnement vis à vis des actions anthropiques, ainsi que par la volonté politique de suffisamment anticiper les actions pour promouvoir et mettre en œuvre une gestion durable.

L'enjeu majeur à l'heure actuelle du fait de sa localisation en zone côtière sera donc de mettre en place une stratégie de gestion de la ressource en eau permettant une utilisation rationnelle pour l'agriculture, pour les besoins industriels et pour l'AEP tout en assurant l'équilibre avec l'écosystème des Niayes. Cette stratégie devra passer par une capitalisation des connaissances nécessaires pour disposer d'outils de gestion et de prévision qui anticipent l'avenir et qui permettent aux décideurs d'agir en amont.

A ce propos, la stratégie de gestion vis à vis de l'intrusion saline pourra s'appuyer sur les orientations suivantes :

- Amélioration de la compréhension du fonctionnement du système,
- Développement de gestion intégrée et dynamique des ressources en eau à l'échelle de la région,

- Optimisation des exploitations dans les zones sensibles dans une perspective durable,
- Intégration des enjeux de développement liés aux ressources en eau souterraines.

5.2. Orientations stratégiques

5.2.1. Amélioration des connaissances sur le fonctionnement de la nappe

L'analyse de l'état des lieux (baisse) et de la vulnérabilité vis à vis de l'intrusion a fait ressortir les efforts qui devraient être faits en termes de poursuite d'acquisition des données et d'outils de gestion pour intégrer les enjeux et contraintes. Ce déficit de connaissances et de données de suivi représente un frein pour l'évaluation des tendances à moyen et long terme surtout dans les zones vulnérables. Ces données intégrées dans les modèles existants dans la zone devraient permettre d'anticiper sur les effets des enjeux actuels et futurs et même de prédire les effets des changements climatiques (élévation du niveau de la mer) sur la progression du biseau salé.

5.2.2. Maitrise des pressions et usages sur la ressource

La connaissance des usages des eaux souterraines et des pressions qu'elles subissent constitue un élément essentiel pour une gestion efficace. L'évaluation de la recharge (précipitation), l'inventaire des points de prélèvement et des sources polluantes permettront d'avoir des indicateurs pertinents sur l'état de la ressource aussi bien du point de vue quantitatif que qualitatif. Ceci doit passer par une centralisation des informations et un renforcement des procédures de remontée d'informations.

5.2.3. Développement de gestion intégrée et dynamique à l'échelle de la région

Cette orientation vise plus particulièrement à préserver qualitativement la ressource qui dans certaines zones sont déjà contaminées par l'intrusion saline. Cette dégradation est beaucoup plus favorisée par le régime d'écoulement de la

nappe mais également la dynamique de baisse du niveau statique qui a été observée dans presque tous les piézomètres. Il s'agit ici de préserver les ressources en eau douce en limitant autant que possible la progression du biseau salé pour rétablir l'équilibre hydrodynamique au niveau de la frange littorale. Ceci devrait passer par une réduction drastique des pressions sur la frange vulnérable en favorisant uniquement l'exhaure par puits (limiter les gros pompages). Egalement l'apport ponctuel d'eau provenant d'ailleurs (par recharge induite) peut être envisagé comme réponse pour soulager la ressource locale. En terme opérationnelle, l'exemple de GCO qui exploite la nappe maastrichtienne pour alimenter le bassin d'extraction des sables lourds est illustratif en ce sens puisque ce procédé permet une remontée de nappe à la frange côtière dont l'effet est de repousser l'interface eau douce/ eau salée.

Cette logique peut être envisagée par un transfert d'eau et/ou le captage de la nappe profonde du Maastrichtien pour le maraichage dans certaines zones sensibles dont l'infiltration a tendance à faire remonter la nappe sur la frange littorale (zone Nord). Des plus les prélèvements dans les zone vulnérables doivent être testés par modèle pour évaluer les probables effets, d'où la nécessité de développer un modèle dynamique qui prend en compte l'ensemble des enjeux pour évaluer leurs conséquences sur le système.

5.2.4. Optimisation de l'exploitation dans les zones vulnérables pour une perspective durable

L'enjeu recherché ici est de maintenir et/ou d'améliorer l'équilibre hydrodynamique qui résorbe l'avancée du biseau salé dans les zones sensibles. Comme il a été constaté sur la frange côtière et dans la zone Nord, l'occurrence de l'intrusion saline s'est déjà signalée au niveau de plusieurs ouvrages captant la tranche supérieure de la nappe (puits). Il s'agit pour cette orientation, d'opter pour des mesures de gestion et de protection de la ressource dans ces zones. Ces mesures peuvent être de plusieurs ordres :

- Autoriser des captages uniquement par puits (faibles débits) dans les zones sensibles non encore contaminées,
- Interdire tout captage par forages dans les zones vulnérables,

- Privilégier le transfert à partir des ouvrages situés en amont de l'écoulement ou dans la nappe maastrichtienne.

5.2.5. Intégration des enjeux de développement liés aux ressources en eau

Ces enjeux se situent essentiellement dans la zone par le développement du maraîchage et autres types d'agriculture mais également par le développement de l'industrie extractive (phosphate, sables minéralisés). Leurs effets sur la dynamique de la ressource en eau se sont fait déjà sentir par une baisse continue du niveau de la nappe et une augmentation de la salinité au niveau des zones sensibles.

Dans le but de protéger les ressources, il serait impératif de passer d'une gestion passive à une gestion active de la ressource à partir de modèles hydrodynamiques qui permettent de simuler les prélèvements futurs liés à ces enjeux et d'en évaluer les impacts.

5.3. Mécanismes de mise en œuvre et plans d'action.

Le tableau ci-après présente les axes stratégiques, les résultats obtenus, les actions clés proposées et les sources de financements.

Axes stratégiques	Résultats attendus	Actions proposées	Actions clés	Sources de financements
Amélioration de la compréhension du fonctionnement du système	<ul style="list-style-type: none"> -connaissance du potentiel exploitable -connaissance sur les zones à exploiter - gestion opérationnelle 	<ul style="list-style-type: none"> -installation de piézomètres dans les zones sensibles -suivi réguliers des paramètres -sensibilisation des acteurs -remontée d'informations sur les captages et sur la qualité -mise en place d'un modèle de gestion 	<ul style="list-style-type: none"> -MHA / DGPRES, OFOR -services techniques décentralisés -regroupements producteurs -industriels, miniers 	<ul style="list-style-type: none"> -Etat, partenaires financiers -Public / Privé
Maitrise des pressions et usages sur la ressource	<ul style="list-style-type: none"> -meilleure connaissance sur la recharge -prélèvements connus -sources et types de 	<ul style="list-style-type: none"> -recherches sur les processus de recharge -inventaire des ouvrages et suivi des pompages -inventaires des sources 	<ul style="list-style-type: none"> -MHA / DGPRES, OFOR -services techniques décentralisés -regroupements producteurs -industriels, miniers 	<ul style="list-style-type: none"> -Etat, partenaires financiers -PPP

	polluants connus	polluantes-remontée d'informations sur les captages et sur la qualité Application des mesures définies dans les zones vulnérables Application des textes réglementaires Sensibilisation des acteurs	-institutions de recherche	
Gestion intégrée et dynamique de la ressource	-rétablissement de l'équilibre dynamique de la nappe	-réduction des pompages dans les zones sensibles -recharge induite -transfert d'eau vers les zones vulnérables - contrôle et suivi des dômes piézométriques -modèle hydrodynamique	-MHA / DGPRES OFOR -services techniques décentralisés -regroupements producteurs -industriels, miniers -installations de recherches	-Etat, - PRIVES

		Sensibilisation et participation des acteurs		
Optimisation de l'exploitation dans les zones vulnérables	Maintien ou amélioration de la qualité	-mesures de protection par réduction ou interdiction de captage dans les zones vulnérables -transfert d'eau vers les zones vulnérables -captage de la nappe profonde comme alternatif	-MHA -usagers	-Etat, - PRIVES
Intégration des enjeux de développement	Maintien ou amélioration de la qualité	-mesures de protection -gestion active de la ressource	-MHH usagers	Etat

6. Conclusion et recommandations

La zone d'intervention du PADEN qui correspond à la zone des Niayes localisée le long du littoral entre Dakar et St-Louis constitue aujourd'hui la principale zone de production horticole du pays avec plus de 60% de la production du pays et 80% des exportations horticoles. Elle subit du fait de son contexte éco géographique de fortes pressions qui ont pour conséquences une dégradation accélérée de ses ressources naturelles (eau, sols et végétation). Les ressources en eau qui représentent un capital précieux pour le développement socio-économique de cette région demeure tout de même vulnérable face aux processus naturels (intrusion saline) comme aux effets anthropiques (pompages, pollutions, recharges induites) et sa protection devient plus qu'une nécessité. C'est dans ce cadre que le projet de ***Cartographie de la vulnérabilité de la nappe des Niayes à l'intrusion saline : Evaluation - Cartographie et Orientations stratégiques pour une meilleure gestion*** initiée par la DGPRE pour le compte du programme PADEN vise à évaluer et à cartographier la vulnérabilité de la nappe du littoral nord du Sénégal vis-à-vis de l'intrusion saline suite à l'impact anthropique et climatique actuel.

Il s'agit dans le cadre des investigations de partir des données analytiques existantes qui ont été réactualisées pour caractériser l'occurrence de l'intrusion saline dans le système et évaluer sa vulnérabilité face aux contraintes naturelles comme anthropiques. L'analyse de la vulnérabilité utilisant le modèle **GALDIT** simplifié a fait ressortir 4 zones de vulnérabilités graduelles :

- Une bande de vulnérabilité élevée localisée principalement sur la frange côtière délimitée par la valeur de charge de 0.5m correspondant à une profondeur d'interfaces de moins de 20 m ;
- Une zone vulnérable délimitée par le tracé des charges hydrauliques comprises entre 0.5 à 1m qui est contigüe à la bande de vulnérabilité très élevée;
- Une zone de vulnérabilité moyenne correspondant à la zone où les valeurs de charges hydrauliques sont comprises entre 1 et 2m (profondeur d'interfaces entre 40 et 80m ;

- Une zone faiblement vulnérable vis-à-vis l'intrusion saline qui s'étend vers l'intérieur des terres.

Les deux dômes piézométriques présents dans la zone ont été considérés comme zones sensibles car contrôlent l'écoulement du système et ont un impact réel sur la baisse du niveau de la nappe dans sa frange côtière.

Des orientations stratégiques ont été dégagées dont le but principal est la préservation durable de la ressource tout en optimisant les enjeux de développement horticole, industriel, social et écologique de la région. Les axes ciblés se situent à 5 niveaux :

- Amélioration de la compréhension du fonctionnement du système,
- Développement de gestion intégrée et dynamique des ressources en eau à l'échelle de la région,
- Optimisation des exploitations dans les zones sensibles dans une perspective durable,
- Intégration des enjeux de développement liés aux ressources en eau souterraine pour lesquels un plan d'actions a été élaboré prenant en compte les actions à réaliser, les acteurs impliqués et les sources potentielles de financements.

Il ressort nettement que la présente étude mérite d'être approfondie par des investigations complémentaires sur la franche côtière et dans les zones vulnérables identifiées. Ces investigations complémentaires porteront sur des études géophysiques en profil perpendiculaire au trait de cote pour préciser la morphologie du biseau salé de même que son extension à l'intérieur des terres. Dans cet même ordre d'idée, des investigations géochimiques utilisant des traceurs naturels comme les ions bromures, chlorures, bore, en compléments des isotopes stables et radioactifs de l'eau (Oxygène 18 (^{18}O), Deutérium (^2H) et Tritium (^3H)) et des isotopes radioactifs du Bore, Strontium et des Sulfates permettront de quantifier l'impact de l'avancée du biseau dans la nappe ainsi que son âge approximatif.

Références bibliographiques

ANTEA (2007) : Etudes hydrogéologiques complémentaires - Investigations géophysiques et nivellement des points d'eau. Rapport Investigations géophysiques - Lot 1, Rapport A 48290/A

BRGM (1978) : Etude hydrogéologique des calcaires lutétiens entre Bambey et Louga. (2^{ème} phase). Rapport de synthèse. FAC.

BRGM (1987) : Etude des ressources en eau souterraine du Sénégal - Campagne de prospection géophysique. BID

BRGM (1992) : Réévaluation de la ressource en eau du Littoral Nord : synthèse des données, modélisation hydrodynamique et simulation prévisionnelles. Rapport BRGM / Services sol et sous sol Département eau.

CGG (1957) : Reconnaissances Hydrogéologiques et Structurales par Sondages Electriques au Sénégal en Mauritanie et en Casamance.

CGG (1973) : Reconnaissance par prospection électrique entre Tivaouane et Saint-Louis du Sénégal. OMS.

CPGF (1977) : Etude de l'Amélioration en eau de 7 centres de l'intérieur. Etude géophysique. Région de Louga.

CPGF (1978) : Renforcement de l'alimentation en eau potable de la région de Dakar. Méwane-Sakal - Etude géophysique entre Kébemer et Méké. PNUD-OMS.

DIOUF S. (1995) : Application de la géophysique à l'étude de la géométrie du réservoir de l'aquifère du Littoral Nord de Taiba à Rao. Université Cheikh Anta Diop de Dakar.

FALL, M. (1986) -Environnements sédimentaires quaternaires et actuels des tourbières des niayes de la grande côte du Sénégal. *Thèse de 3ème cycle*. Univ. Dakar. 136p.

FAYE S. (1995) : Modélisation hydrodynamique des nappes de Littoral Nord entre Cayar et Saint-Louis. Impact des futurs prélèvements envisagés dans le cadre de l'approvisionnement Thèse 3^{ème} cycle département de géologie de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar.

MARTIN A. (1970) : Les nappes de la presqu'île du Cap Vert. Leur utilisation pour l'alimentation en eau de Dakar. Rapport BRGM (0007).

NOEL, Y. (1975) -Etude hydrogéologique des calcaires lutétiens de la région de Bambey (1ère phase). *Rapport BRGM 75 Dak 01, 47p.*

ANNEXES : chroniques de mesures au niveau des ouvrages de suivi

