

République du Sénégal



Un Peuple - Un But - Une Foi

\*\*\*\*\*

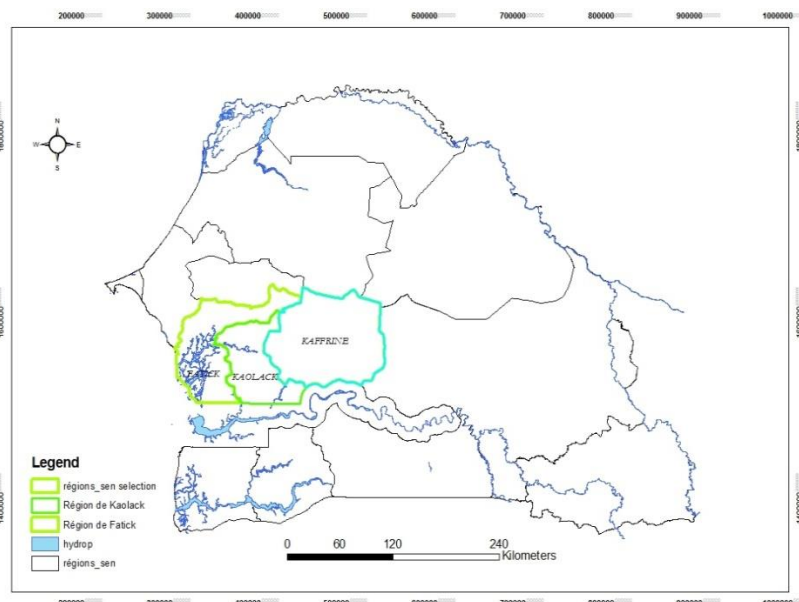
MINISTRE DE L'HYDRAULIQUE ET DE L'ASSAINISSEMENT

\*\*\*\*\*

DIRECTION DE LA GESTION ET DE LA PLANIFICATION DES RESSOURCES EN EAU



## Rapport R5/R6 - synthèse de l'étude hydrogéologique et évaluation des potentialités des ressources mobilisable de l'aquifère du Continental Terminal



PROGRAMME EAU POTABLE ET  
ASSAINISSEMENT  
DU MILLENAIRE (PEPAM)



PROJET SECTORIEL EAU ET  
ASSAINISSEMENT (PSEA)

*Etudes hydrogéologiques et  
hydrologiques  
complémentaires de la nappe  
du Continental Terminal de la  
zone Sine-Gambie  
Rapport R5*

Octobre 2017

Version	Objet de la révision	Date	Etabli par	Vérifié et approuvé par
02	Version définitive	20 Octobre 2017	Serigne FAYE	Djibril DIAGNE

Financement : Banque Africaine de Développement (BAD)

Réalisé par le Groupement



## SOMMAIRE

---

<b>1.</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>11</b>
1.1.	Contexte de l'étude .....	11
1.2.	Rappel des TDR.....	12
1.3.	Objectif et contenu du rapport de synthèse .....	14
<b>2.</b>	<b>TRAVAUX REALISES DURANT LE PROJET .....</b>	<b>15</b>
3.2.1.	Pluviométrie.....	26
3.2.2.	Morphométrie .....	30
3.2.3.	Ecoulement.....	30
	Le bassin versant de la Néma.....	32
	Les bassins versants de Thyssé Kayemor .....	35
	Le bassin versant du Saloum.....	36
	<b>Etude de la marée et de la salinité sur le Djikoye et le Baobolon.....</b>	<b>37</b>
3.2.4.	Bilan hydrique .....	38
	Conclusion .....	39
	<b>Niveau statique .....</b>	<b>40</b>
	<b>Piézométrie.....</b>	<b>40</b>
	<b>Caractéristiques hydrauliques .....</b>	<b>42</b>
	<b>Prélèvements .....</b>	<b>43</b>
	<b>Sites potentiels d'implantation.....</b>	<b>44</b>
	<b>Réalisation d'ouvrages test .....</b>	<b>45</b>
3.4.1.	Définition du modèle conceptuel .....	54
	Prise en compte des prélèvements.....	56
	Régime hydrodynamique .....	56
3.4.2.	<b>Résultat du calage du modèle hydrogéologique.....</b>	<b>57</b>
	Données de calage .....	57
	Répartition des perméabilités calées .....	57
	Répartition de la recharge et de l'évapotranspiration .....	58
	Piézométrie calculée par le modèle .....	60
	Débits d'exhaure dans les cours d'eau.....	63
	Bilans hydrodynamiques .....	63

<b>3.4.3. Simulations de scénarios d'exploitation de l'aquifère .....</b>	<b>65</b>
3.4.3.1. Localisation des champs captant et Définition des scénarios	65
Objectifs de volumes journaliers.....	66
Scénarios simulés .....	67
Régime et durée des simulations.....	77
Adaptation du maillage du modèle.....	77
Calcul des rabattements simulés.....	78
Prise en compte du biseau salé.....	79
3.4.3.2. Résultats des scénarios	80
3.4.4. Potentiel exploitable.....	110
<b>4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS .....</b>	<b>112</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : localisation de la zone du projet.....	12
Figure 2 : distribution de l'ensemble des forages existant dans la zone du projet.....	16
Figure 3 : distribution des piézomètres existants.....	16
Figure 4: Carte de répartition des SE réalisés .....	17
Figure 5: Points d'eau nivelés .....	18
Figure 6: Réseau de mesure campagne Juin 2016 .....	19
Figure 7: Réseau de mesures campagne Novembre 2016 .....	20
Figure 8: Ouvrages réalisés dans le cadre du projet.....	22
Figure 9 : Coupe géoélectrique CC.....	24
Figure 10: Coupe géologique CC.....	24
Figure 11: Distribution de l'épaisseur de l'aquifère.....	25
Figure 12: Variations des pluies annuelles (mm) à Kaolack, Foundiougne, Nioro du Rip, Toubacouta et Kéréwan .....	28
Figure 13: Distribution spatiale des pluies annuelles (mm) de 1960-2014 et des normales 1961-1990, 1971-2000 et 1981-2010 .....	29
Figure 14: les grands traits de la morphologie de la zone Sine-Gambie .....	30
Figure 15: Niveau piézométrique Juin 2016 .....	42
Figure 16: débit moyen d'exploitation journalier.....	44
Figure 17: distribution des valeurs de CE mesurées en Juin.....	50
Figure 18: diagramme de Piper représentant les faciès chimiques .....	52
Figure 19: distribution des teneurs en chlorure Juin 2016.....	52
Figure 20: distribution des teneurs en nitrates Juin 2016 .....	53
Figure 21: Extension du modèle hydrogéologique de l'aquifère du Continental Terminal..	54
Figure 22: Répartition des perméabilités calées dans le modèle Visual Modflow .....	58
Figure 23: Répartition des zones de recharge sur l'extension du modèle.....	59
Figure 24: Niveaux piézométriques simulés par le modèle Visual Modflow et niveaux piézométriques mesurés aux points d'observation .....	61
Figure 25 : Comparaison des charges simulées et des charges observées aux points de mesures piézométriques et statistiques des erreurs de calage .....	62
Figure 26: Localisations proposées pour les trois champs captant à tester .....	66
Figure 27: Localisation des forages du champ captant de Simon Diene .....	68
Figure 28 : Localisation prévisionnelle des forages du champ captant de Ndiayene Moussa. ....	70
Figure 29: Localisation prévisionnelle des forages du champ captant de Keur Madiabel ...	74
Figure 30: Rabattements piézométriques simulés pour le scénario 1 .....	80



Figure 31: Evolution des niveaux piézométriques simulés aux forages pour le scénario 1..	83
Figure 32: Trajectoires simulées en régime permanent pour le scénario 1 .....	83
Figure 33: Rabattements piézométriques simulés pour le scénario 2.....	85
Figure 34: Evolution des niveaux piézométriques simulés aux forages pour le scénario 2..	86
Figure 35: Trajectoires simulées en régime permanent pour le scénario 2.....	87
Figure 36: Rabattements piézométriques simulés pour le scénario 3.....	90
Figure 37: Evolution des niveaux piézométriques simulés aux forages pour le scénario 3..	92
Figure 38: Trajectoires simulées en régime permanent pour le scénario 3.....	93
Figure 39: Rabattements piézométriques simulés pour le scénario 4.....	96
Figure 40: Evolution des niveaux piézométriques simulés aux forages pour le scénario 4 (partie 1).....	99
Figure 41: Evolution des niveaux piézométriques simulés aux forages pour le scénario 4 (partie 2).....	99
Figure 42: Trajectoires simulées en régime permanent pour le scénario 4.....	100
Figure 43: Rabattements piézométriques simulés pour le scénario 5.....	103
Figure 44: Evolution des niveaux piézométriques simulés aux forages pour le scénario 5 (partie 1).....	106
Figure 45: Evolution des niveaux piézométriques simulés aux forages pour le scénario 5 (partie 2).....	106
Figure 46: Trajectoires simulées en régime permanent pour le scénario 5.....	107
Figure 47: Proposition d'implantation d'ouvrages de suivi de la nappe à proximité des nouveaux champs captant.....	115

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Débits moyens mensuels et annuels (m <sup>3</sup> /s) du Djikoye à Médina Djikoye de 1976 à 1993 .....	31
Tableau 2 : Médina Djikoye - Modules annuels (m <sup>3</sup> /s), volumes (m <sup>3</sup> ) et lames écoulées (mm) et restitutions des nappes phréatiques (%) .....	32
Tableau 3: Bilan des écoulements du bassin versant de la Néma à Néma Ba.....	34
Tableau 4: Bassin versant de Ndiba (S1, Thyssé Kaymor) - Synthèse des caractéristiques de l'écoulement .....	36
Tableau 5: Coefficients d'écoulement médian et décennaux sec et humide des bassins de Ndiba et du Saloum.....	37
Tableau 6: sites potentiels d'après puissance de nappe.....	45
Tableau 7: Forage test de Keur Ndiayene Moussa.....	46
Tableau 8: Forage test de Keur Madiabel .....	46
Tableau 9: Caractéristiques des piézomètres réalisés .....	46
Tableau 10: statistique descriptive des paramètres physicochimiques en Juin .....	49
Tableau 11: statistique descriptive des paramètres chimiques en Juin .....	49
Tableau 12: Valeurs de recharge annuelle calées dans le modèle .....	60
Tableau 13: Débits d'exhaure simulés de la nappe vers les cours d'eau .....	63
Tableau 14: Termes du bilan hydrodynamique du modèle Visual Modflow calé.....	64
Tableau 15: Débits simulés par forage pour le scénario 1 .....	67
Tableau 16: Débits simulés par forage pour le scénario 2 .....	69
Tableau 17: Débits simulés aux 9 forages pour le scénario 3 .....	71
Tableau 18: Débits simulés aux 18 forages pour le scénario 4 .....	72
Tableau 19: Débits simulés aux 18 forages pour le scénario 5 .....	76
Tableau 20: Niveaux piézométriques et rabattements simulés aux forages pour le scénario 1.....	81
Tableau 21: Position théorique du biseau salé au droit des forages avant et après pompage pour le scénario 1.....	84
Tableau 22: Niveaux piézométriques et rabattements simulés aux forages pour le scénario 2.....	86
Tableau 23: Position théorique du biseau salé au droit des forages avant et après pompage pour le scénario 2.....	88
Tableau 24: Niveaux piézométriques et rabattements simulés aux forages pour le scénario 3.....	91
Tableau 25 : Position théorique du biseau salé au droit des forages avant et après pompage pour le scénario 3.....	94
Tableau 26: Niveaux piézométriques et rabattements simulés aux forages pour le scénario 4.....	98

Tableau 27: Position théorique du biseau salé au droit des forages avant et après pompage pour le scénario 4.....	102
Tableau 28: Niveaux piézométriques et rabattements simulés aux forages pour le scénario 5.....	105
Tableau 29: Position théorique du biseau salé au droit des forages avant et après pompage pour le scénario 4.....	109
Tableau 30: Bilan d'eau des phases de calage et de simulation .....	111

---

## Avant Propos

---

Ce présent rapport intitulé « *Synthèse de l'étude hydrogéologique et évaluation des potentialités des ressources mobilisables de l'aquifère du Continental terminal* » constitue le livrable R5 du projet intitulé " Etudes hydrogéologiques et hydrologiques complémentaires de la nappe du Continental Terminal de la zone Sine-Gambie " commandité par la DGPRE dans le cadre du programme programme PEPAM PSEA et financé par la BAD. Il résulte des travaux d'investigations hydrologiques et hydrogéologiques suivis de la modélisation hydrogéologique de la phase II du projet. Il fait suite aux rapports R1 à R4 pour faire le bilan des résultats issus de l'étude.

Il a été réalisé par l'équipe du projet :

- Pr. Serigne Faye, Hydrogéologue/chef de mission
- Charlotte Thierion, expert en modélisation hydrogéologique
- Dr Honore Dacosta, Hydrologue
- Mr Oumar Ka, expert SIG
- Djibril Diagne, Hydrogéologue/Chef de Projet

en collaboration avec les assistants du chef de mission Terence Edgar Benam, Al Ousseynou Ba, Ndeye Maguette Dieng Ndao qui ont participé à la compilation des documents de travail, à la conception et la réalisation des cartes et coupes.

L'étude a par ailleurs bénéficié du soutien des structures suivantes : la Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau (DGPRE) et la Direction de l'Hydraulique (DH).

## Résumé

---

Ce rapport sur « **Synthèse de l'étude hydrogéologique et évaluation des potentialités des ressources mobilisables de l'aquifère du Continental terminal** » s'inscrit dans le cadre du projet PAPAM PSEA " **Etudes hydrogéologiques et hydrologiques complémentaires de la nappe du Continental Terminal de la zone Sine-Gambie** " financé par la BAD. Il s'intègre dans la stratégie de la DGPRE à rechercher des ressources en eau potable de bonne qualité et en quantité suffisante pour le transfert vers les zones défavorables.

Ce document vise comme objectif global d'évaluer les potentialités mobilisables pour le transfert et de faire la synthèse des résultats issus du projet. Il reprend au-delà du contexte et de la problématique, les différentes phases d'investigations suivies de l'interprétation des données synthétisées dans un modèle de gestion.

Les résultats des investigations effectuées montrent un potentiel de volume de pluie de l'ordre 6.5 milliards de m<sup>3</sup> par an qui alimente aussi bien le ruissèlement de surface que la nappe superficielle par recharge directe. Cette dernière maintient l'écoulement de base de Madina Djokoye, Nema et Baobolon. Du point de vue hydrogéologique, l'aquifère du CT de puissances variables (30-120 m) présente des transmissivité de  $10^{-3}$  à  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s capable de fournir d'excellents débits à plus de 150 m<sup>3</sup>/h. L'écoulement de la nappe se fait grossièrement à partir de la zone de dôme piézométrique (+24 m) vers toutes les directions suivant un gradient hydrauliques variables (dépendant de la transmissivité). Vers le Nord, une dépression piézométrique à -4m en moyenne qui étend selon une direction W-E d'altitude collecte l'écoulement de la nappe. La nappe qui bénéficie d'une recharge saisonnière atteignant 101 mm/an présente des caractéristiques physico chimiques et chimiques de qualité excellente à l'exception des points d'eau localisés à la lisière du fleuve Saloum et de l'estuaire mais également de points d'eau contaminés localement par les activités domestiques et/ou pastorales autour des puits.

Le potentiel exploitable a été investigué par modèle où différents scénarios de prélèvement jusqu'à 67562 m<sup>3</sup>/j sur 40 ans ont été testés sans que les réserves de

la nappe soient altérées. Les sites de forages ont ciblé 3 champs captant (Simon Diene, Ndiayene Moussa Ndiaye et Keur Madiabel) avec des débits simulés atteignant 90 m<sup>3</sup>/h pour certains. Les rabattements induits sont faibles à l'exception de ceux des forages implantés dans les zones de perméabilités moyennes à faibles. Les bilans d'eau entre les entrées et sorties du système indiquent que la nappe est faiblement sollicitée (8% maximum) et l'apport par les limites à eau salée est relativement faible compte tenu de la dimension de ces limites. Toutefois, lors de la phase opérationnelle, il s'avère nécessaire d'opérer à un choix plus judicieux des sites d'implantation (pour éviter les forts rabattements) mais également d'implanter des piézomètres de suivi dans les zones vulnérables dans l'optique d'une préservation de la ressource.

## 1. INTRODUCTION

### 1.1. Contexte de l'étude

La zone d'étude est située au Centre Ouest du Sénégal et couvre partiellement les régions administratives de Kaolack, de Fatick et Kaffrine. Elle est limitée au Nord par le fleuve Saloum, à l'Ouest par l'Océan Atlantique, au Sud par la frontière gambienne, à l'Est par le méridien passant par Kaffrine (Figure 1). La géomorphologie de la région est représentée par une vaste plaine qui s'étend de la côte avec des altitudes de 0 m dans le système estuarien jusqu'à +40 m OIGN à l'intérieur des terres. Le Système hydrologique est constitué par le fleuve Saloum, par ses deux bras qui sont le Diomboss et le Bandiala, et de nombreux petits ruisseaux appelés localement « bolons » qui sont tous salés. De plus, on note la présence au Sud le Djikoye et le Baobolon appartenant au fleuve Gambie et la Néma qui constituent les seules rivières pérennes de la zone du projet.

Deux aquifères sont rencontrés au niveau de la zone ; la nappe profonde du Maastrichtien qui est saumâtre dans toute la zone du projet (car comprise dans la bande centrale salée) et la nappe superficielle contenue dans les formations géologiques du Continental Terminal. Ce dernier présente un intérêt pour les besoins d'AEP des populations locales et également celles des Iles du Saloum dans le contexte actuel où les enjeux sont :

- Une amélioration de la qualité de l'eau de boisson dans les zones à eau saumâtre à travers des unités de traitement et de systèmes de transfert de différentes échelles dans les zones défavorisées (îles du Saloum et localités avoisinantes);
- un accroissement de la demande en eau lié à l'accroissement démographique et aux besoins agricoles et industriels ;
- une variabilité climatique (pluviométrique) qui se répercute sur les réserves en eau souterraines ;
- une dégradation de la qualité de l'eau du fait de l'intrusion saline et des actions anthropiques;

- l'amélioration des connaissances pour une gestion durable des ressources en eau.

Ces différents enjeux justifient la nécessité de réévaluer les potentiels de ce système du point de vue quantitatif et qualitatif mais également de déterminer le potentiel exploitable durablement.

Ainsi le sous-programme PEPAM-BAD avec comme maître d'ouvrage la DGPRE s'est engagé à réaliser ce projet intitulé « études hydrogéologiques et hydrologiques complémentaires de la nappe du Continental Terminal de la zone Sine-Gambie » en vue de proposer des options de captage et de valorisation pérenne assurant une desserte correcte des populations tout en préservant les ressources mobilisables. Le groupement TPF-SETICO/GENHY/ANTEAa a été chargé de l'exécution de ce projet.

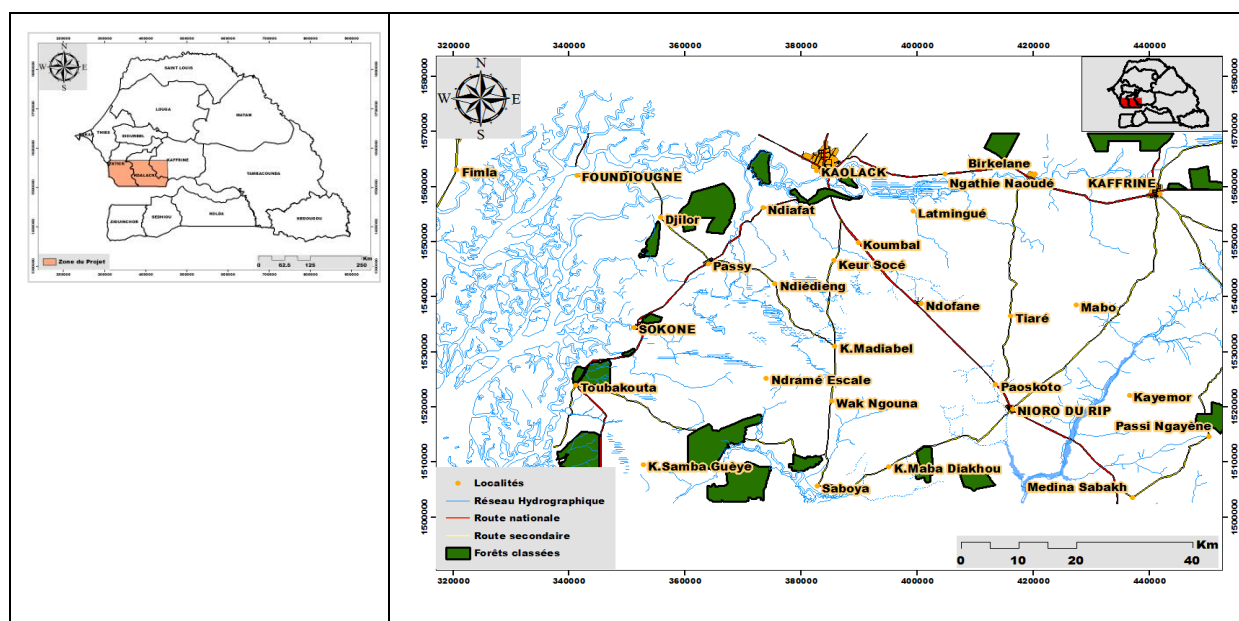


Figure 1: localisation de la zone du projet

## 1.2. Rappel des TDR

Le projet a pour objectif global une connaissance approfondie et une évaluation plus fiable des potentialités de la nappe du CT dans le but d'un transfert d'eau vers les zones vulnérables en termes de qualité de l'eau.

Les objectifs spécifiques visent :



- Une revue documentaire et une actualisation des études antérieures et données disponibles sur la nappe du Continental Terminal ;
- Des investigations hydrogéologiques et hydrologiques (incluant la géophysique, le nivellement, la réalisation d'ouvrages test et la cartographie) de la nappe du Continental Terminal;
- La réalisation d'un modèle mathématique, outil de gestion prévisionnelle de la nappe du Continental Terminal intégrant leur interaction avec les eaux de surface qui permet d'évaluer les potentialités des ressources en eau mobilisables en vue d'un transfert vers les zones défavorables ;
- La formation des agents de la DGPPE.

Ces objectifs spécifiques ci-dessus énumérés devraient permettre d'aboutir à **4 résultats majeurs** qui sont :

- **Résultat 1 : Actualisation des connaissances à partir d'une synthèse bibliographique et identification des lacunes sur les études antérieures sur la zone du projet.** Cette revue a déjà fait l'objet du rapport R1 portant sur l'orientation méthodologique;
- **Résultat 2 : une caractérisation de la géométrie de l'aquifère et une synthèse hydrologique et hydrogéologique permettant de dégager le mode de fonctionnement de l'hydrosystème.** Ces résultats ont été délivrés sous deux rapports R2 et R3 portant respectivement sur la Géométrie de l'aquifère et sur la synthèse hydrogéologique et hydrologique;
- **Résultat 3 : la construction d'un modèle mathématique suivi de simulations de prélèvement (rapport R4) a permis de délivrer un outil de gestion et une formation des agents de la DGPPE;**
- **Résultat 4 : une synthèse de l'étude qui prend en compte les résultats majeurs est l'objet de ce présent rapport R5.**

Pour rappel, le Groupement TPF-SETICO Ingénierie/GENHY Conseils/ANTEA avait basé son approche méthodologique suivant 3 Phases que nous résumons succinctement ci-après :

- **Phase n° 1 : Activités préliminaires portant sur la revue documentaire et la réactualisation des connaissances ;**
- **Phase n° 2 : Activités d'investigations hydrologiques et hydrogéologiques** incluant la géophysique, le nivellement, la conception et le contrôle de l'exécution des ouvrages, la cartographie permettant de concevoir le modèle conceptuel de fonctionnement de la nappe ;
- **Phase n° 3 : Construction de modèles mathématiques, outils de gestion prévisionnelle des ressources en eau, d'analyse des interactions et évaluation des potentialités des ressources en eau mobilisables.**

### **1.3. Objectif et contenu du rapport de synthèse**

L'objectif du rapport R5 tels que définis dans les TDR et la méthodologie vise surtout à faire la synthèse des résultats majeurs obtenus à l'issue de l'étude et à dégager le potentiels exploitables et les recommandations pour une gestion durable des ressources en eau de la nappe du Sine Gambie.

## **2. TRAVAUX REALISES DURANT LE PROJET**

Ci-après, nous rappelons très brièvement les travaux d'investigations réalisés depuis le début du projet. La méthodologie détaillée est déjà présentée dans les différents rapports R1 à R4 ci haut énumérés.

### **2.1. Collecte de données existantes et identification de lacunes**

Il s'est agi prioritairement de faire l'inventaire des données et des études antérieures pertinentes pour le projet, suivi d'un diagnostic et d'une évaluation critique pour relever les manquements et orientations pour la recherche de données complémentaires pour la phase II.

En gros, ces travaux ont permis de capitaliser un certain nombre de données relatives à plusieurs thèmes:

- **Climatologie** : Pluies mensuelles (1961-2015), Températures mensuelles (1981-2015), Evapotranspiration (1981-2015) recueillies au niveau de l'ANACIM ;
- **Télédétection** : image Landsat 2012 et modèle numérique de terrain de 15 m de résolution de même qu'un SRTM de 30 m de résolution obtenu à partir de l'image ASTER ;
- **Données sur les caractéristiques techniques, hydrodynamiques et hydrochimiques** des ouvrages de la base PROGRES (Figure 2) ;
- **Nivellement** au GPS différentiel de 43 points d'eau localisés au Nord de la zone du projet (Figure 3);
- **Données de Niveau piézométrique** de 56 points d'eau de 2011 et 2012;
- **Données d'Hydrochimie** de 65 points d'eau et de 4 points d'eau du fleuve Saloum (2011-2012);
- **Données de pompages journaliers** de 27 forages hydrauliques (2012);
- **Carte d'occupation et d'utilisation des sols** issue du traitement de l'image Landsat.

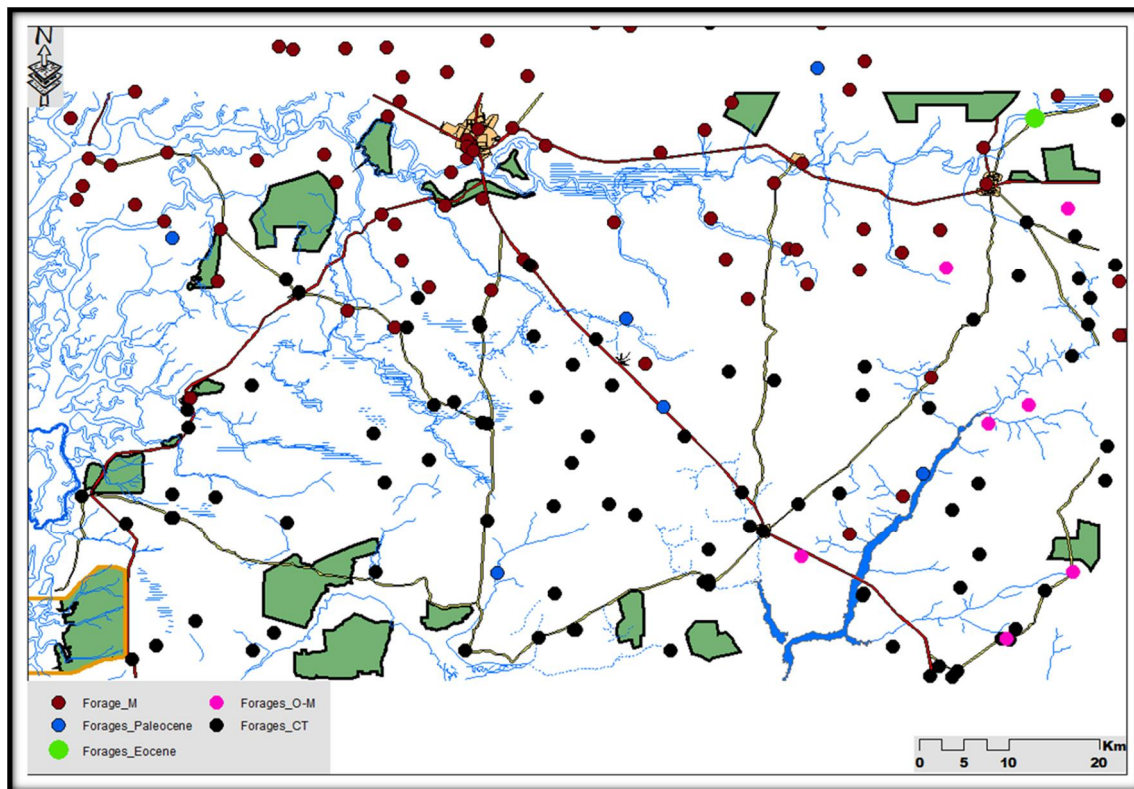


Figure 2 :

distribution de l'ensemble des forages existant dans la zone du projet

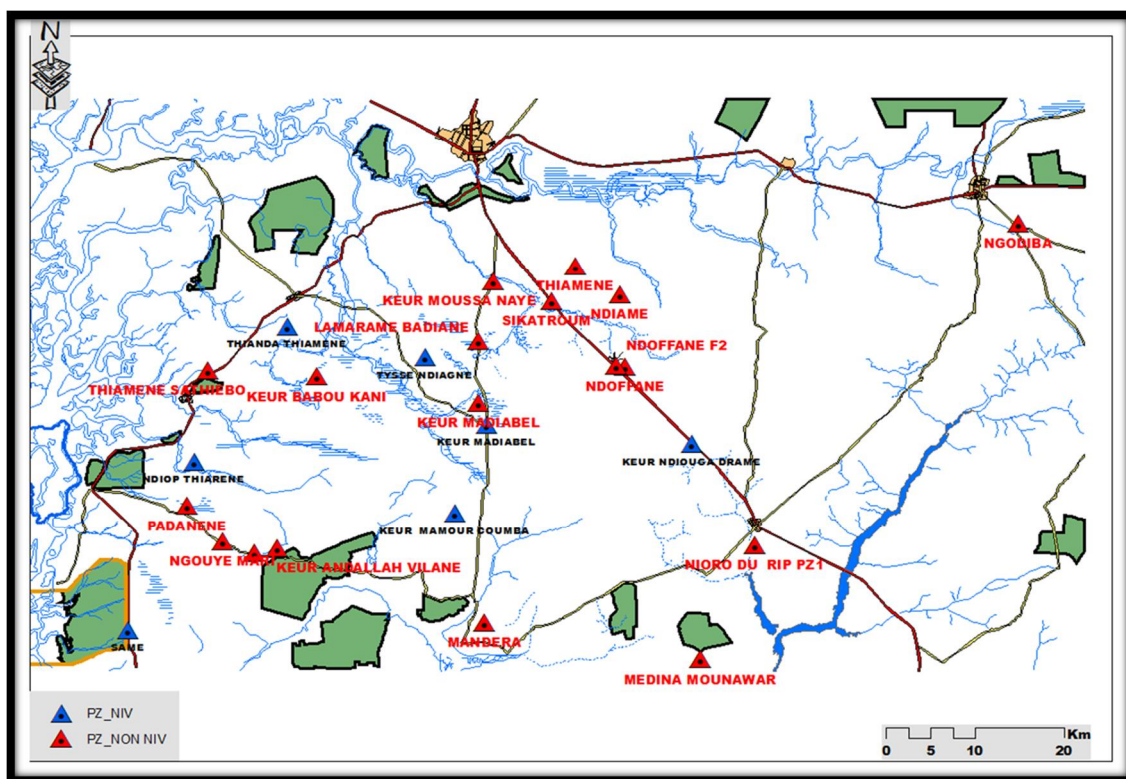


Figure 3 : distribution des piézomètres existants

## 2.2. Investigations géophysiques

Durant la phase 2 du projet, 67 sondages électriques (Figure 4) en AB compris entre 500 à 800 m ont été réalisés. Ces investigations ont pour but de dresser des cartes d'isorésistivités apparentes de l'horizon aquifère du CT, de définir la morphologie du mur du CT et de réaliser 5 coupes géoélectriques permettant d'estimer les puissances utiles d'aquifère à eau douce et les horizons à eau saumâtre.

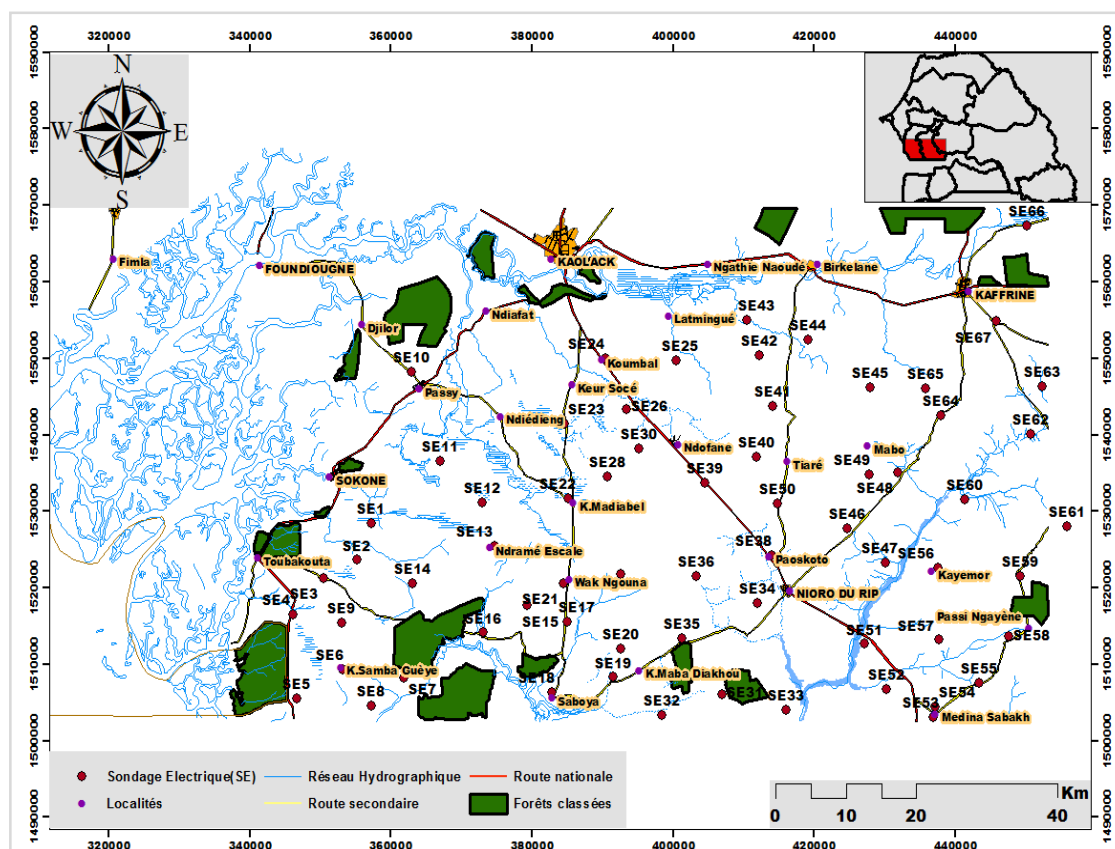


Figure 4: Carte de répartition des SE réalisés

## 2.3. Investigations hydrogéologiques et topographiques

Les investigations de nivellement qui consistent à mesurer les altitudes  $z$  des margelles des ouvrages visent à corriger principalement les valeurs de niveau statique mesuré sur le terrain en niveau piézométrique. Il s'est agi ici de réaliser un nivellement précis ( $\pm 2\text{mm}$ ) d'un réseau de 54 points d'eau (puits, forages et

piézomètres) par GPS différentiel (Figure 5). Ce réseau de mesures a été complété par 38 points antérieurement mesurés au GPS.

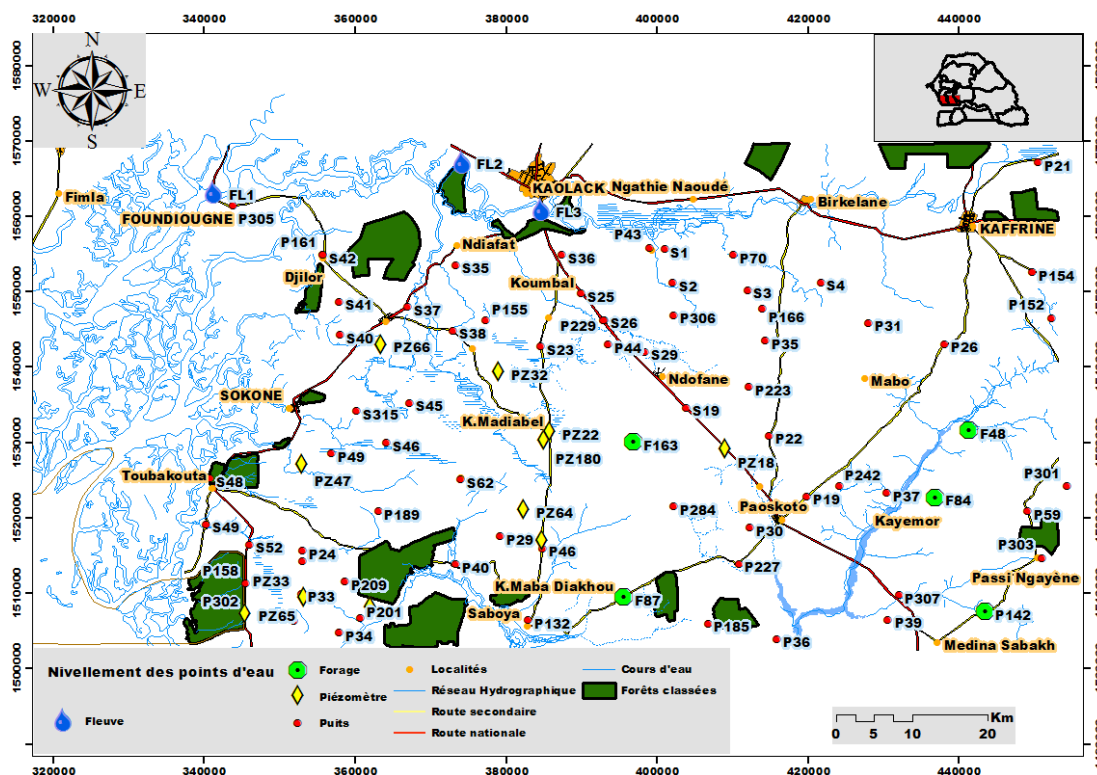


Figure 5: Points d'eau nivelés

En ce qui concerne les investigations hydrogéologiques, deux campagnes de mesures ont été réalisées en Juin et Novembre 2016. La 1<sup>ère</sup> campagne comprend 166 points d'eau dont 80 puits, 17 piézométriques et 69 forages (Figure 6), et la 2<sup>ème</sup> campagne 112 points dont 81 puits, 13 piézomètres et 18 forages (Figure 7).

Les données recueillies pour la 1<sup>ère</sup> campagne sont relatives aux enquêtes de prélèvements mensuels de mars à juin 2016 et concernent tous les forages captant le CT dans la zone d'étude. Lors des investigations de terrain, les paramètres *in situ* de coordonnées géographiques (X et Y en UTM), de niveau statique, de pH, conductivité électrique, O<sub>2</sub> dissous, Température ont été mesurées sur tous les piézomètres et puits du réseau. Dans ce réseau, 54 (1<sup>ère</sup> campagne) et 34 (2<sup>ème</sup> campagne) points d'eau ont été échantillonnés pour analyses chimiques au laboratoire d'hydrochimie du Département de Géologie de l'UCAD. Les analyses ont



porté sur les éléments majeurs ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  and  $\text{NO}_3^-$ ) et de quelques mineurs (Fe et  $\text{F}^-$ ).

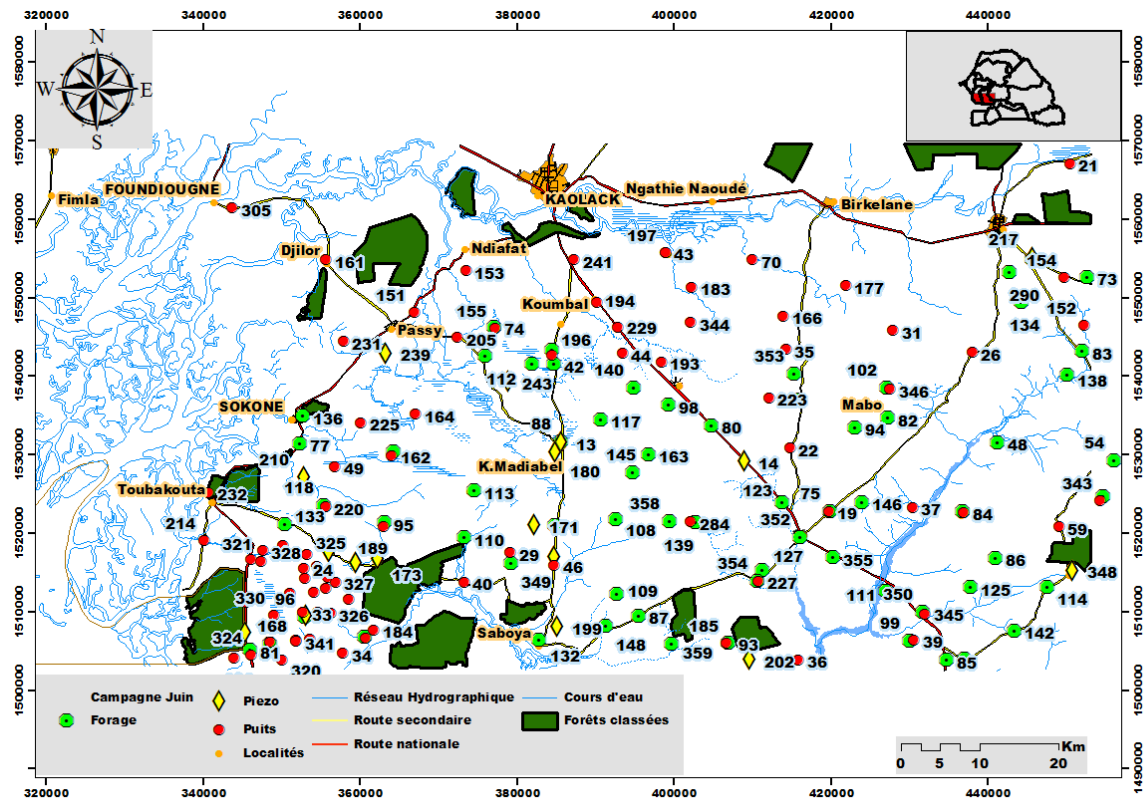


Figure 6: Réseau de mesure campagne Juin 2016

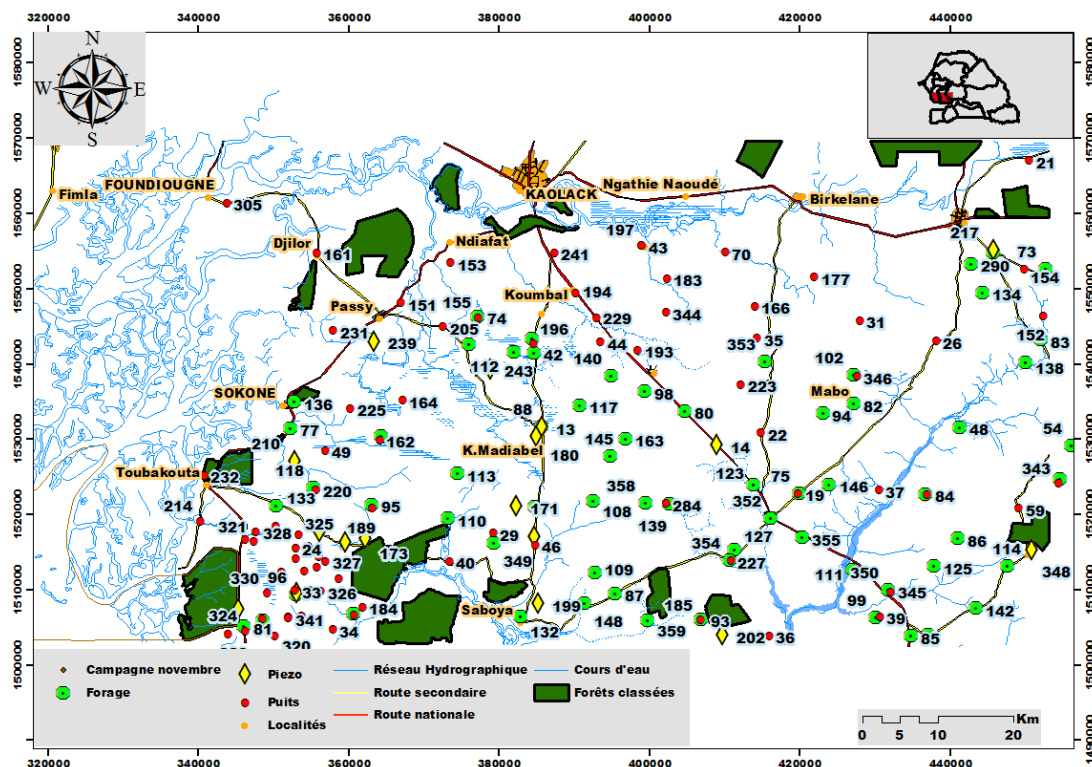


Figure 7: Réseau de mesures campagne Novembre 2016

#### 2.4. Investigations hydrologiques

Les investigations hydrologiques ont porté essentiellement sur les données existantes relatives aux paramètres climatiques, à la caractérisation morphométriques des bassins versants, aux débits d'écoulement des cours d'eau et au bilan hydrique pour évaluer le potentiel de recharge de la nappe.

Les données de base utilisées pour ces investigations sont les suivantes:

- Un jeu de cartes topographiques au 1/50 000 qui couvrent l'ensemble de la zone d'étude ;
- un Modèle Numérique de Terrain du Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de l'agence spatiale américaine (NASA) ;
- Un Modèle Numérique de Terrain obtenu à partir des cartes topographiques 1/50.000', de points géodésiques et d'un ensemble de points d'eau qui ont été nivelés au GPS différentiel ;



- des relevés pluviométriques journaliers des stations et postes situés dans la zone d'étude et son pourtour, complétés par les postes gambiens. Ces données proviennent de différentes sources : l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM), des Directions Régionales du Développement Rural (DRDR) et du Center of Water Resources de Gambie ;
- des données hydrométriques extraites de la base de la Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau (DGPRE) de même que les données de marée du fleuve Gambie.

### **2.5. Investigations cartographiques**

La carte de l'occupation du sol dans la zone d'étude a été réalisée grâce au traitement d'images optiques (images Landsat) par le biais de la télédétection et des systèmes d'information géographiques. Ces images ont été sélectionnées en fonction de la période d'acquisition entre Octobre et Novembre (juste la fin de la saison des pluies) et de la couverture nuageuse (10% de couverture nuageuse au plus). Celles utilisées dans le cadre de ces travaux datent du 26 Novembre 2012 et ont été traitées avec le programme ERDAS Imagine. L'algorithme de classification par maximum de vraisemblance a été utilisé pour déterminer les différents types d'occupation des sols.

### **2.6. Réalisation d'ouvrages test**

Dans le cadre de ce projet, 4 ouvrages ont été réalisés (2 forages et 2 piézomètres) (Figure 8). Les 2 forages ont été réalisés dans les sites potentiels identifiés à Ndiayene Moussa Ndiaye et à Keur Madiabel. Ces deux sites sont marqués par une bonne puissance d'aquifère et de valeurs de résistivités apparentes qui traduisent des caractéristiques hydrauliques relativement élevées (sables très faiblement argileux et nappe faiblement minéralisée). Par contre les deux piézomètres implantés respectivement à Keur Samba Gueye et à Keur Aly Bassine visent le suivi du dôme piézométrique localisé au SW et la progression du biseau salé au Nord vers le Fleuve Saloum. Ces ouvrages réalisés par l'entreprise SENTER/PERFIBASA ont été supervisés et contrôlés par le groupement.

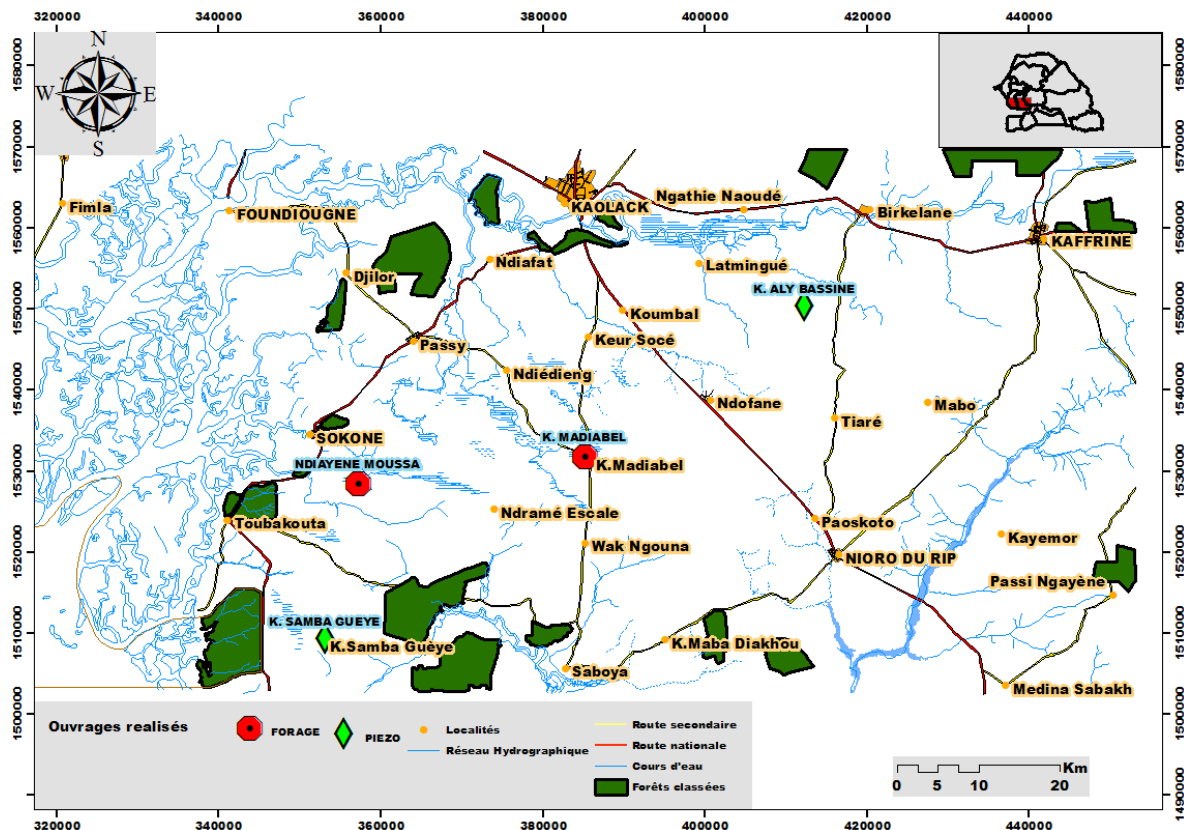


Figure 8: Ouvrages réalisés dans le cadre du projet

### 3. SYNTHÈSE DES RESULTATS

Dans ce chapitre, nous reprenons les principaux résultats issus des travaux d'investigation et consignés dans les rapports précédents.

#### 3.1. Géométrie de l'aquifère

Ce thème a déjà fait l'objet du rapport thématique R2 portant sur la géométrie de l'aquifère. Nous ne présentons ici qu'en guise de rappels, les principaux résultats obtenus et qui sont relatifs au toit, au mur et à l'épaisseur de l'aquifère.

Les valeurs de résistivités très variables allant de 1 à plus de 2000 traduisent une diversité des faciès au droit des points de mesure et aussi le niveau de minéralisation de la nappe. Les fortes valeurs supérieures à 1000 ohms correspondent à des sables relativement francs qu'il soit mouillé ou pas. Ce type de faciès du fait de sa nature siliceuse est faiblement conducteur. On les rencontre généralement au sommet des profils dans la zone non saturée. Sur certains SE, ces

fortes valeurs de résistivité supérieures à 1000 ohms ont été mesurées en profondeur (dans la nappe) traduisant ainsi des niveaux à fort potentiel avec une eau très faiblement minéralisée. Pour la majeure partie des enregistrements, les valeurs oscillent entre 200 et 400 ohms indiquant ainsi un réservoir sablo argileux à eau de faible minéralisation. Les faibles valeurs inférieures à 100 jusqu'à 0,1 ohm indiquent soit un réservoir argilo sableux soit un horizon à eau saumâtre ou le substratum argileux ou marneux.

Les coupes géoélectriques (CC) et géologique (C) donnent un exemple d'interprétation des résultats de la géophysique (Figures 9 et 10). Ces types de coupes couvrant l'étendue de la zone du projet montrent une géométrie très irrégulière du mur argilo marneux des formations sableuses, sablo argileuses, argilo sableuses et argileuses du CT. Ce substratum a été affecté par de nombreuses failles verticales avec des décrochements verticaux après dépôts des formations de l'Éocène. Cette irrégularité de la morphologie du mur serait également le fait d'une intense phase d'altération intervenue après la régression post éocène. On note toutefois, un soulèvement du substratum dans la partie Ouest mais également vers le Nord Est de la région. La puissance de l'aquifère est également variable de 20 à plus de 100 m au niveau des coupes. L'interprétation des valeurs de résistivités et l'examen des logs de forages ont surtout permis de mettre en évidence les fortes variations latérales et verticales de faciès constitués de sables francs allant à des sablo argileux, argiles sableuses jusqu'à des argiles. Cette nature des faciès et leur distribution dans la zone ont certainement une influence sur les caractéristiques hydrauliques de l'aquifère.

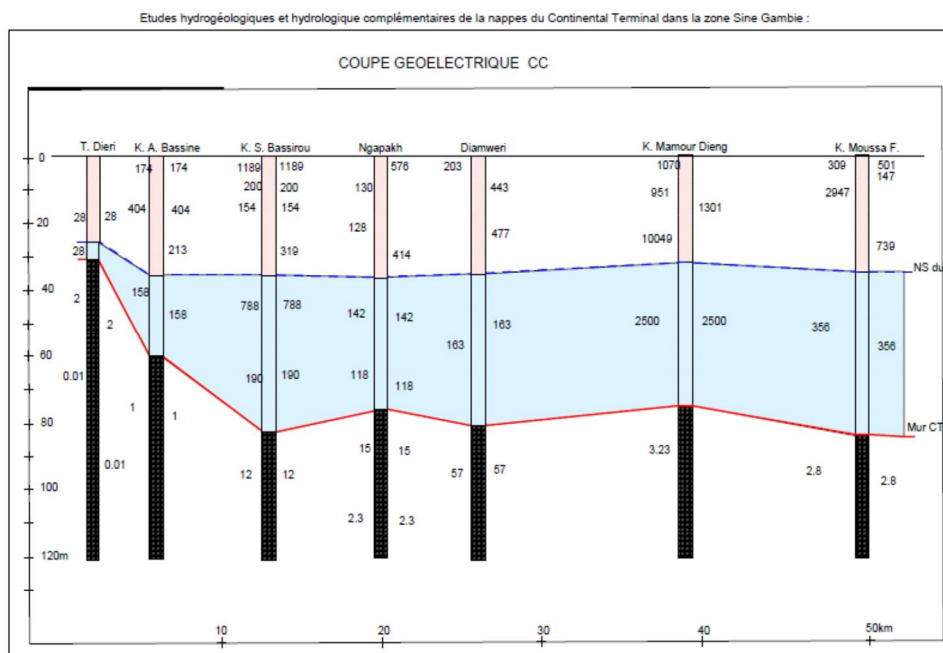


Figure 9 : Coupe géoélectrique CC

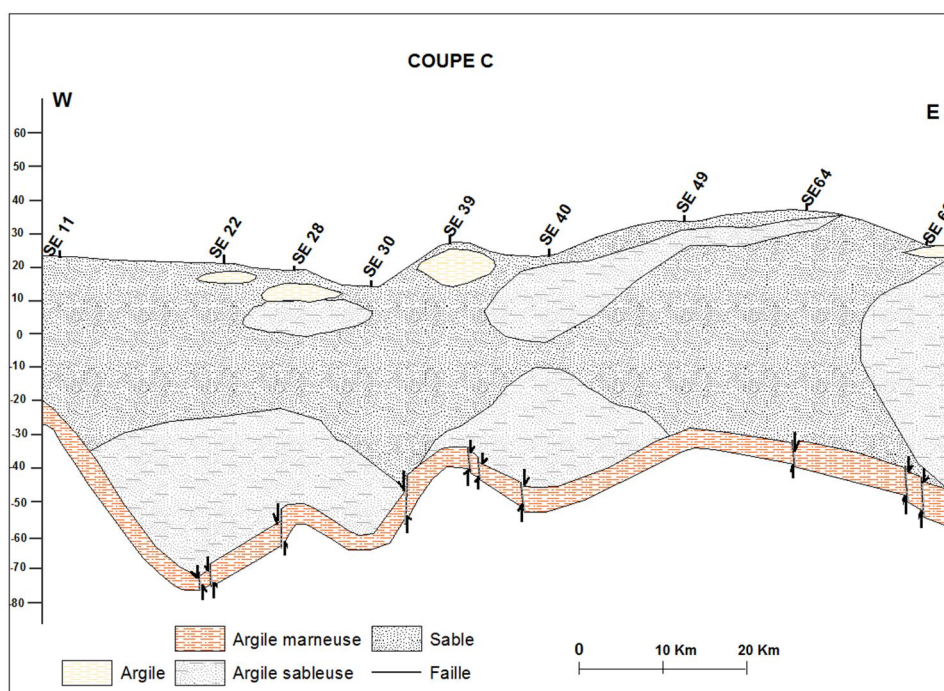


Figure 10: Coupe géologique CC

Le modèle géologiques à 3D issu des données discrètes de côtes du toit et du mur de l'aquifère permet de restituer la géométrie de l'aquifère dans l'ensemble du domaine d'étude. La topographie de la région obtenue à partir d'un MNT (Figure



### **3.2. Fonctionnement hydrologique et bilan hydrique**

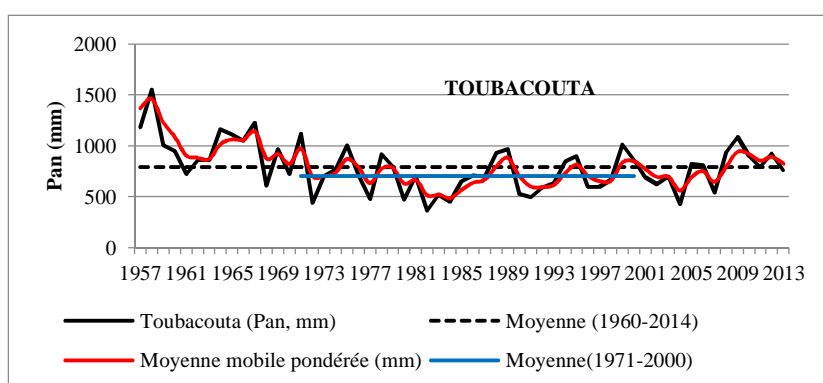
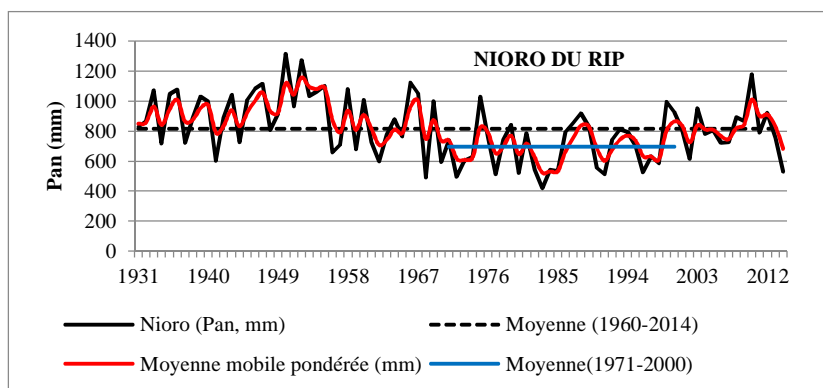
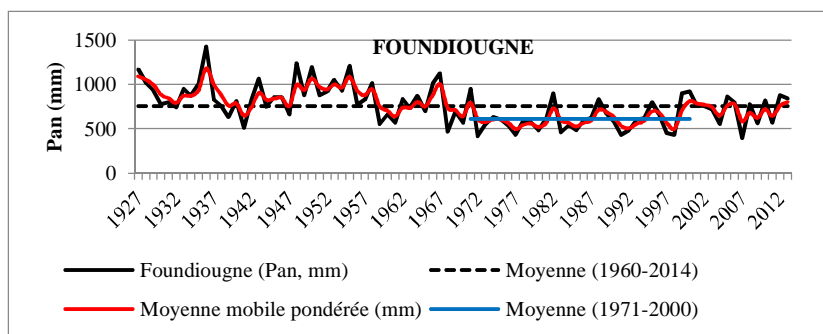
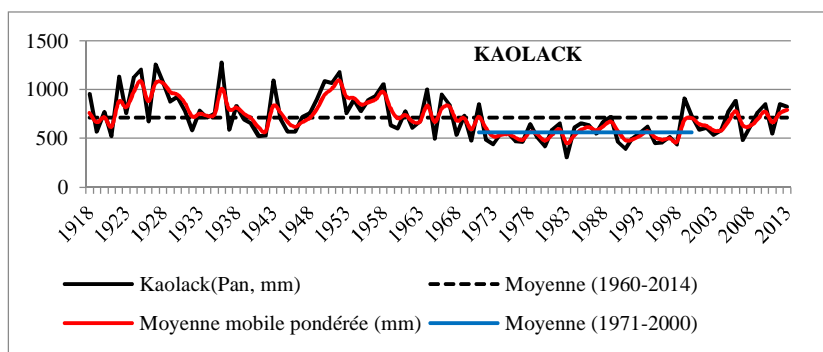
Les objectifs de l'étude thématique porte sur la caractérisation du climat, des bassins versants et des éléments de l'hydrologie de surface permettant d'évaluer les potentiels en ressources en eau de surface et les apports en eaux souterraines par les pluies.

#### **3.2.1. Pluviométrie**

Les pluies annuelles traitées des stations de Kaolack, Foundiougne, Nioro du Rip, Toubacouta et Kéréwan (Figure 12) montrent les tendances suivantes :

- Du début XX<sup>ème</sup> siècle à 1970 : correspondant à une phase globalement excédentaire,
- De 1970 à 1998 : une période très déficitaire marquée correspondant la phase de sécheresse qui a sévi dans toute l'Afrique subsaharienne,
- De 1999 à 2014 : une reprise timide de la pluviométrie avec une forte variabilité interannuelle.

Pour ces cinq stations, les valeurs centrales dans la distribution spatiale montrent une baisse progressive du Sud vers le Nord.



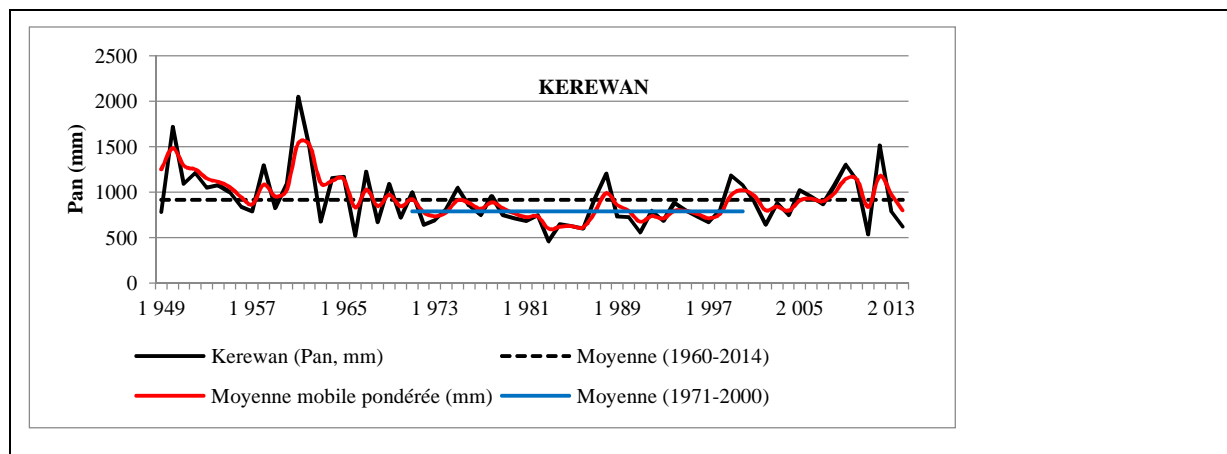


Figure 12: Variations des pluies annuelles (mm) à Kaolack, Foundiougne, Nioro du Rip, Toubacouta et Kéréwan

La distribution de la pluviométrie a été analysée spatialement sur la période allant de 1960 à 2014, soit 54 ans qui est assez représentative du climat actuel de la zone d'étude. Pour ces données, les méthodes du double cumul (Brunet-Moret Y. 1971), du Vecteur Régional (Hiez G. 1969, Brunet-Moret Y. 1977, Hiez G. 1977, Brunet-Moret Y. 1979, Hiez G. 1986) ont été utilisées permettant de vérifier leur cohérence intrinsèque et spatiale. Les résultats montrent une répartition spatiale assez cohérente de la pluviométrie moyenne suivant un gradient sud-nord et une forte variation oscillant entre 24% à Nioro du Rip et 33% à Kéréwan.

La répartition spatiale de la pluviométrie annuelle a été cartographiée (Figure 13) à différents pas de temps :

- 1960-2014 : la pluviométrie varie entre 620 mm au nord et 820 mm au sud
- 1961-1990 : entre 600 mm et 840 mm
- 1971-2000 : entre 580 mm et 760 mm
- 1981-2010 : entre 600 mm et 780 mm soit une légère remontée des isohyètes.



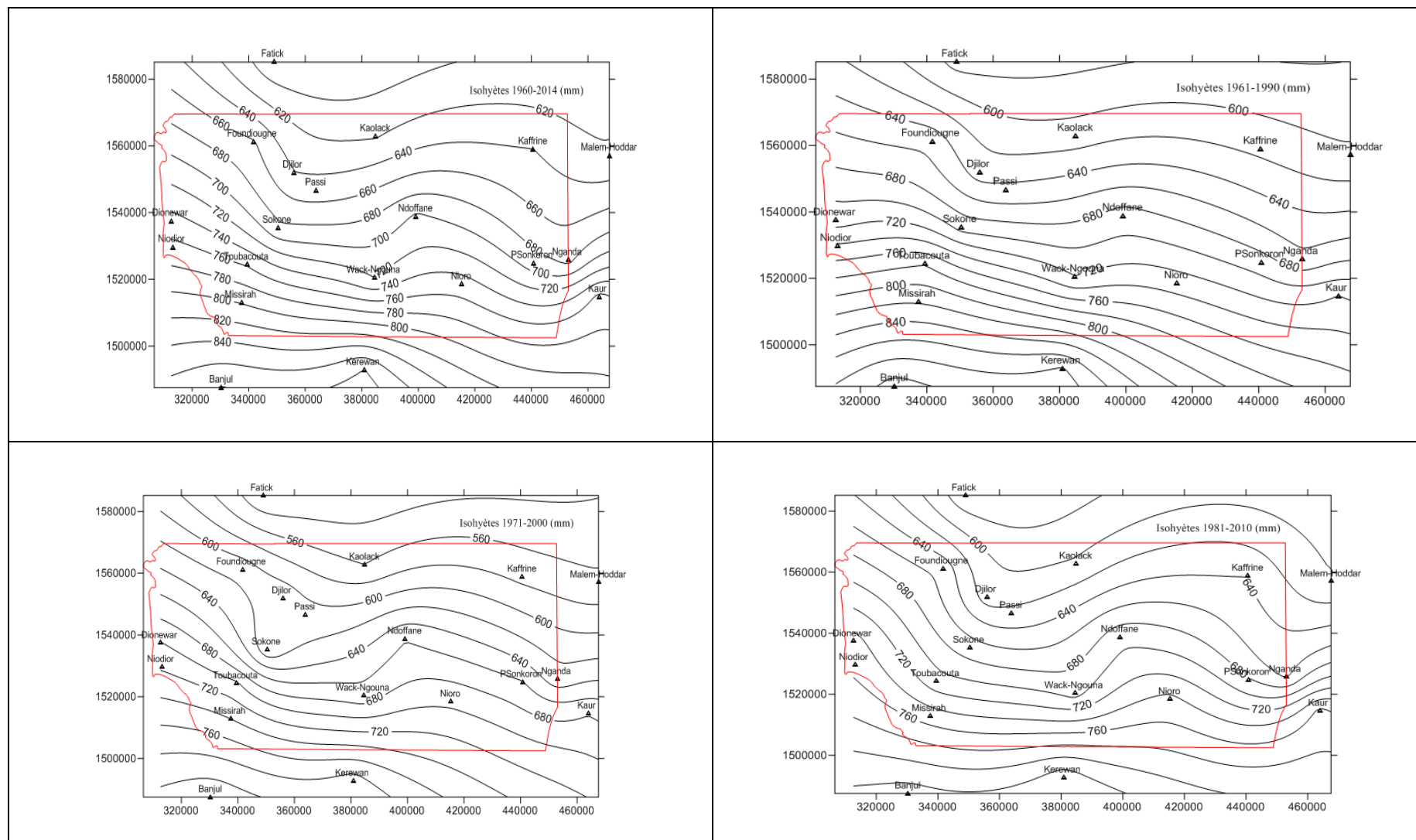


Figure 13: Distribution spatiale des pluies annuelles (mm) de 1960-2014 et des normales 1961-1990, 1971-2000 et 1981-2010

### 3.2.2. Morphométrie

La zone Sine-Gambie compte plusieurs bassins versants de superficies et de formes différentes. Une analyse affinée, utilisant le SRTM de la Nasa, a permis de délimiter les différents bassins versants comme le montre la figure 14. Elle montre une nette opposition entre les bassins continentaux, de plus grande surface, par rapport à ceux du littoral beaucoup plus petits :

- Les grands bassins sont : Baobolon, Bil, Keur Konkoudia, Madina Djikoye et dans une moindre mesure ceux de Yerwago et Karang.
- Un ensemble de petits bassins versants longent le littoral depuis la rive sud du Saloum jusqu'à la frontière nord de la Gambie.

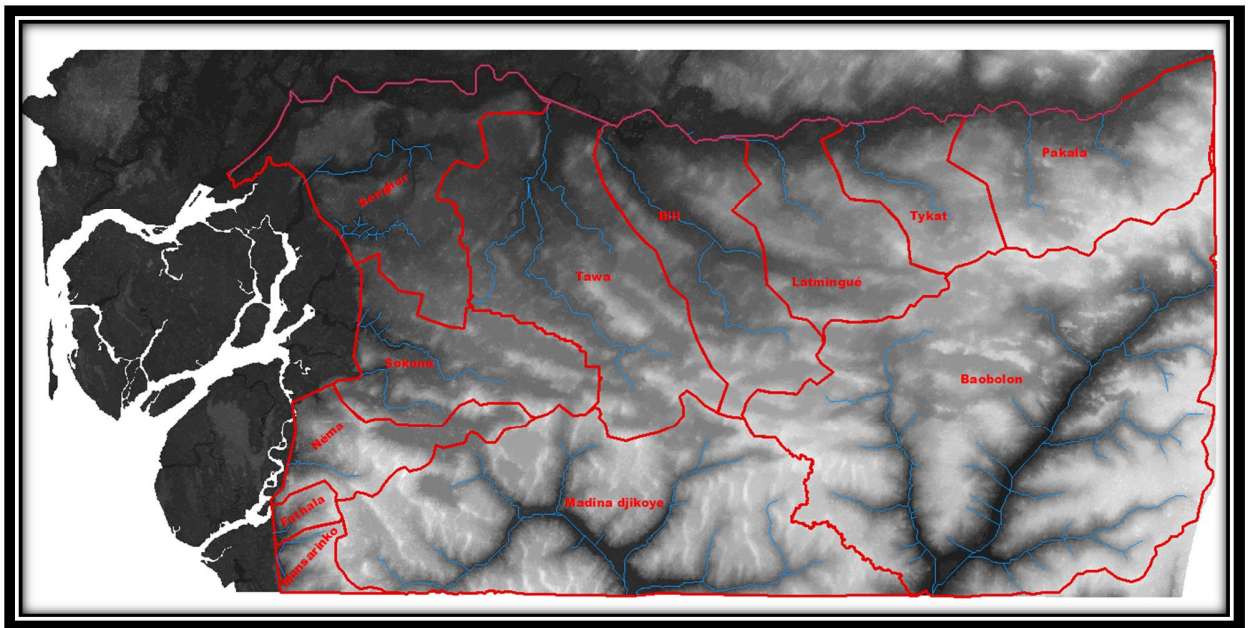


Figure 14: les grands traits de la morphologie de la zone Sine-Gambie

### 3.2.3. Ecoulement

Les écoulements dans la zone Sine-Gambie ne sont mesurés que sur peu de bassins versants : Madina Djikoye, La Néma et de petits sous affluents du

Baobolon à Thyssé Kayemor. Nous nous appuyerons sur les données des années hydrologiques complètes de ces bassins pour caractériser le fonctionnement hydrologique de la zone Sine-Gambie.

### *Le Madina Djikoye*

Les données hydrologiques sur le bassin versant de Madina Djikoye sont complètes sur 7 années hydrologiques de 1976 à 1993. Le tableau 1 qui résume les données existantes, au pas de temps mensuel, sur le Djikoye montre de faibles des débits moyens mensuels et annuels.

Tableau 1 : Débits moyens mensuels et annuels (m<sup>3</sup>/s) du Djikoye à Médina Djikoye de 1976 à 1993

Année	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Dec	Janv	Fev	Mars	Avril	AN
MOY	0,129	0,210	0,304	0,832	0,683	0,512	0,300	0,278	0,269	0,255	0,221	0,168	0,347
E.T	0,1073	0,2296	0,185	0,7363	0,3469	0,346	0,2064	0,1863	0,15373	0,1534	0,1525	0,1085	0,2427
C.V.	0,83	1,09	0,61	0,88	0,51	0,68	0,69	0,67	0,57	0,60	0,69	0,65	0,71
MAX	0,28274	0,8147	0,578	3,0474	1,6744	1,2882	0,7122	0,5362	0,50891	0,5	0,5	0,3278	0,89756
MIN	0,00248	0,028	0,064	0,21388	0,35466	0,152	0,0557	0,0589	0,05468	0,0571	0,02578	0,0173	0,09034

Les modules annuels sont assez faibles de même que les débits moyens mensuels. Le maximum mensuel est de 3 m<sup>3</sup>/s en août 1991. Toutefois, les variations annuelles et mensuelles sont très importantes, avec des coefficients de variation supérieurs à 50%. Pour les 7 années hydrologiques complètes, les apports moyens du Djikoye se chiffrent à 10 millions de m<sup>3</sup> (tableau 2).

Tableau 2 : Médina Djikoye - Modules annuels (m<sup>3</sup>/s), volumes (m<sup>3</sup>) et lames écoulées (mm) et restitutions des nappes phréatiques (%)

Année hydrologique	Modules annuels (m <sup>3</sup> /s)	Volume écoulé (m <sup>3</sup> )	Lame écoulée (mm)	Vol. écoulé (juillet-nov) m <sup>3</sup>	Restitutions nappes (m <sup>3</sup> )	Restitutions nappes (%)
1978-79	0,6308	19 906 850	66,4	13 184 000	6 722 850	33,8
1979-80	0,3279	10 347 422	34,5	5 783 500	4 563 922	44,1
1980-81	0,1523	4 806 538	16,0	3 422 700	1 383 838	28,8
1981-82	0,3089	9 748 459	32,5	5 679 900	4 068 559	41,7
1982-83	0,4333	13 673 908	45,6	7 867 800	5 806 108	42,5
1983-84	0,2789	8 801 731	29,4	5 339 500	3 462 231	39,3
1984-85	0,1687	5 325 030	17,8	3 820 300	1 504 730	28,3
Moyenne	0,3287	10 372 848	34,6	6 442 528,6	3 930 319,5	36,9

Il ressort que la pérennité de l'écoulement de la rivière demeure quelle que soit la configuration de la saison des pluies. Les débits maxima sont assez faibles pour un bassin versant de cette superficie mais l'étalement des crues montre l'importance du stockage dans le bassin et la restitution lente des eaux pendant l'année.

#### Le bassin versant de la Néma

Le bassin de la Néma situé au nord de celui de Madina Djikoye présente une surface plus faible (58 km<sup>2</sup>), de forme assez allongée latitudinalement avec un drain principal qui parcourt le bassin d'est en ouest. Deux stations hydrométriques y sont implantées à Néma Ba et Néma Nding.

Le tableau 3 présente le bilan des écoulements dans le bassin de la Néma à Néma Ba. Le volume écoulé est très variable d'une année à une autre. Le volume maximum mesuré est de 10 millions de m<sup>3</sup> (1976-77); le volume minimum est enregistré en 1983-84 avec 159 000 m<sup>3</sup>. La lame écoulée varie entre 173 et 2,7 mm et la lame écoulée moyenne est de 40 mm.

Contrairement au bassin de Madina Djikoye, l'influence de la marée à Néma Ba ne permet pas une bonne appréciation des écoulements en saison sèche. Au pont de Néma Nding, les écoulements sont pérennes même si le débit est très faible. L'importance du bas fond et la faiblesse des pentes entre les deux stations entraînent un grand stockage d'eau et une diminution assez importante des apports à Néma Ba.

**Tableau 3: Bilan des écoulements du bassin versant de la Néma à Néma Ba**

Date Début	Date Fin	Q.Début (m3/s)	Q.Fin (m3/s)	Q_Ma xi (m3/s)	Volume_Ecou l (m3)	V_Ruiss (m3)	Q_Ecou l (m3/s)	Q_Ruis s (m3/s)	L_Ecou l (mm)	L_Ruiss (mm)	L_Nappe (mm)
02/06/1976 12:00	29/04/1977 12:00	0.0485	0.125	33.5	10036000	7554800	0.3509	0.2642	173	130.3	42.7
01/05/1977 12:00	30/04/1978 12:00	0.121	0	2.75	2747700	845010	0.0873 7	0.0268 7	47.4	14.6	32.8
02/05/1978 12:00	30/04/1979 12:00	0	0	0.794	2217500	2217500	0.0707	0.0707	38.2	38.2	*
01/05/1979 12:00	30/04/1980 12:00	0	0	0.58	2489100	2489100	0.0789 3	0.0789 3	42.9	42.9	
01/05/1980 12:00	30/04/1981 12:00	0	0	0.325	627670	627670	0.0199 6	0.0199 6	10.8	10.8	
01/05/1981 12:00	30/04/1982 12:00	0	0	0.4	636220	636220	0.0202 3	0.0202 3	11	11	*
01/05/1982 12:00	30/04/1983 12:00	0	0	1.94	871430	871430	0.0277 1	0.0277 1	15	15	
02/05/1983 12:00	30/04/1984 12:00	0	0	0.231	159000	159000	0.0050 56	0.0050 56	2.7	2.7	*
01/05/1993 12:00	30/04/1994 12:00	0	0	21	1422100	1422100	0.0452 2	0.0452 2	24.5	24.5	
01/05/1994 12:00	30/04/1995 12:00	0	0.0395	28.2	4549100	3928000	0.1446	0.1249	78.4	67.7	10.7
01/05/1995 12:00	30/04/1996 12:00	0.0395	0	1.83	1849400	1226600	0.0586 4	0.0388 9	31.9	21.1	10.8
01/05/1996 12:00	30/04/1997 12:00	0	0	0.251	406610	406610	0.0129 3	0.0129 3	7	7	

01/05/1997 12:00	30/04/1998 12:00	0	0	3.63	2061400	2061400	0.0655 5	0.0655 5	35.5	35.5	
	Moyenne	0.016	0.013	7.3	2313325.4	1880418. 5	0.076	0.062	39.9	32.4	24.3

### Les bassins versants de Thyssé Kayemor

Les équipements du bassin de Thyssé Kayemor sont implantés sur des affluents du marigot de Kayemor qui lui-même est un affluent du grand Baobolon, à hauteur du village de Ndiba.

Le tableau 4 présente une synthèse des caractéristiques de l'écoulement de 1983 à 1990. Les écoulements sont épisodiques sous forme de crues brutales dont l'importance dépend des pluies qui surviennent, de leur succession dans le temps et de l'état de la végétation. On note toutefois la faiblesse des lames écoulées et des coefficients d'écoulement. Il n'y a pas ici d'écoulement de base.

Tableau 4: Bassin versant de Ndiba (S1, Thyssé Kaymor) - Synthèse des caractéristiques de l'écoulement

Année hydrologique	Pmoyenne (mm)	Qmax (m3/s)	Volume écoulé (m3)	Le (mm)	Ke (%)
1983-84	393.6	35.4	157338	9.71	2.47
1984-85	469.2	57.2	196685	12.14	2.59
1985-86	554.8	16	169663	10.47	1.89
1986-87	682.7	44.9	298190	18.41	2.70
1987-88	795.3	3.89	49519	3.06	0.38
1988-89	816.5	57.2	538857	33.26	4.07
1989-90	699.2	55.5	385743	23.81	3.41
1990-91	488.6	21	219380	13.54	2.77
Moyenne	612.5	36.4	251921.9	15.6	2.53

### Le bassin versant du Saloum

Ce bassin était équipé d'une station hydrométrique à Birkélane (8000 km<sup>2</sup>) en 1976 (14.11667°N, -15.73333°W) mais le suivi n'a pas été régulier à cause de la faiblesse des hauteurs d'eau et de leur caractère très épisodique. Ce bassin, de superficie totale 31893,5 km<sup>2</sup>, a fait l'objet d'une évaluation des apports en eau avec le modèle de Yates (Yates D. N. 1997, Manga A. V. 2012). Elle a permis d'estimer les apports en eau du bassin versant du Saloum de 1922 à 2006 au pas de temps mensuel. Sur cette base, les lames écoulées ont été déterminées ainsi que les coefficients d'écoulement annuels. L'ajustement statistique des coefficients d'écoulement annuels sur la période 1960-2006, a permis d'estimer leurs valeurs fréquentielles médian et décennaux sec et humide qui sont consignés dans le tableau 5; ceux du bassin de Ndiba



proviennent de la synthèse des travaux de l'IRD (Albergel J., Bernard A. et al. 1991, Dacosta H. 1992) et du mémoire hydrologique les bassins de Madina Djikoye et la Néma (Mendy A. 2010). Ces coefficients serviront à l'estimation des volumes écoulés médian et décennaux sec et humide pour les principaux bassins versants de la zone Sine-Gambie.

Tableau 5: Coefficients d'écoulement médian et décennaux sec et humide des bassins de Ndiba et du Saloum

Bassin versant	Ke 0.10 (%)	Ke médian (%)	Ke 0.90 (%)
Ndiba (S1)	2.502	3.226	3.735
BV Saloum	1.059	1.503	2.353
BV Djikoye	4.84	5.65	6.283
BV Néma	1.58	3.87	8.71
0.10 : décennale sèche			
0.90 : décennale humide			

### Etude de la marée et de la salinité sur le Djikoye et le Baobolon

L'onde de la marée remonte dans le fleuve Gambie jusqu'à plus de 380 km de son embouchure. Cependant, à l'instar de la Casamance (Brunet-Moret, 1970), les observations de la marée sur le fleuve montre un cycle semi-diurne (deux marées hautes et deux marées basses diurnes) dont l'amplitude des ondes s'amortissait rapidement en remontant vers l'amont mais que les amplitudes des ondes semi-mensuelles et annuelles restaient presque constantes et importantes tout le long du fleuve.

En saison des pluies l'écoulement fluvial peut, par son importance, annuler l'onde de marée qui s'efface. C'est ce qui se produit sûrement sur le Koular en saison des pluies où on peut noter l'adoucissement total de l'eau par suite du

refoulement de la marée par les eaux de ruissellement de la partie amont du bassin. Dans un tel cas, la hauteur maximale annuelle de la marée est difficile à déterminer car elle survient généralement après l'équinoxe d'automne alors que la plus basse marée se produit autour de l'équinoxe de printemps.

### 3.2.4. Bilan hydrique

Les données climatiques des stations de Kaolack, Nioro du Rip et Kéréwan (Gambie) ont servi pour le calcul du bilan hydrique.

Un bilan mensuel par la méthode de Turc (Turc L. 1954) a été calculé avec les équations ci-dessous dans lesquelles l'ETP représente l'évapotranspiration mensuelle; J, le nombre de jours dans le mois; T, la température mensuelle moyenne; Rg, la radiation globale à la latitude du lieu; hr, l'humidité relative. Quand l'humidité relative est supérieure à 50%, on utilise la première équation; dans le cas contraire, c'est la seconde.

$$ETP = 0,013 * T * \left( \frac{R_g}{100} \right) + 50 * \left( \frac{T}{T + 15} \right), (2.1)$$

$$ETP = 0,013 * T * \left( \frac{R_g}{100} \right) + 50 * \left( \frac{T}{T + 15} \right) * \left( \frac{50 - hr}{70} \right), (2.2)$$

Les résultats P-ETP, au pas de temps mensuel pour les stations de Kaolack (nord), Nioro du Rip (centre) et Kéréwan (sud) montrent au nord que les pluies plus faibles et espacées dans le temps ne favorisent pas la mise à disposition d'eau pour la reconstitution de la réserve utile (RFU) et la percolation vers les nappes souterraines. Seules 10 années sur 50 ont un excédent supérieur à 200 mm. Au centre de la zone (Nioro), c'est 20 ans sur 50 et au sud (Kéréwan, c'est 30 ans, soit 1 année sur 2. Il apparaît ainsi que les disponibilités suivent un gradient décroissant du sud vers le nord avec un déficit de plus en plus fort.

Un bilan décennal calculé à partir des données de la station référentielle de Nioro du Rip du fait de sa position centrale dans la zone Sine-Gambie a montré que la réserve se constitue, après satisfaction de la réserve utile ou réserve facilement utilisable (RFU) au mois d'août et septembre. Cette RFU s'épuise rapidement dès le mois d'octobre. Pour la première décennie 1961-1970 dont une seule année (1968) est déficitaire en pluviométrie, la réserve, qui s'est reconstituée suite aux bonnes pluies des mois de juillet à septembre, est de 143.3 mm. Les décennies 1971-1980 et 1981-1990, marquées par un fort déficit pluviométrique, les réserves ont été respectivement de 19.1 mm et 0.3 mm. Une lente reconstitution des nappes s'amorce à partir de 1991-2000 avec 28.7 mm et 109.4 mm pour la dernière décennie.

Un bilan plus détaillé, au pas de temps mensuel sur une période de 3 ans, calculé pour les bassins versants de la Néma et de Madina Djikoye a mis en évidence une disponibilité pour la recharge variable d'une année à une autre avec à Néma 74.7 mm, pour l'année 1994 contrairement aux années 1976 et 1997 où la RU ne serait pas satisfaite.

Pour Madina Djikoye, la disponibilité est évaluée à 160, 77, 60 mm respectivement pour les années 1978, 1981 et 1980. Ces lames assurent la recharge et renforcent les réserves de la nappe expliquant la pérennité de l'écoulement dans ce bassin

## Conclusion

Sur le plan hydrologique, les investigations ont porté essentiellement sur l'analyse des données existantes - celles-ci ont permis de définir le régime climatique de la région qui depuis 1998 connaît un retour timide avec une variabilité très importante d'une année à l'autre. Les quantités de pluie tombées dans la région sont en moyenne entre 618 et 880 mm/an pour la période 1960-2014 correspondant à un potentiel de volume de l'ordre de 6.5 milliards de m<sup>3</sup> par an. Ce potentiel alimente aussi bien le ruissellement de

surface que la nappe superficielle par recharge directe. En ce qui concerne les écoulements de surface, parmi les 12 bassins versants identifiés par interprétation SRTM et MNT, seuls 3 présentent un écoulement permanent ; il s'agit de Madina Djokoye, Nema et Baobolon où les débits moyens en dehors des périodes de crues sont relativement faibles ( $0.016$  à  $0.35 \text{ m}^3/\text{s}$ ) correspondant à des volumes entre 2 et 10 millions de  $\text{m}^3$ . Une grande partie de cet écoulement est assuré par la restitution de la nappe superficielle qui soutient leur régime ; celle-ci atteint 37% au niveau de Madina Djikoye.

### **3.3. Fonctionnement hydrogéologique et hydrochimique**

#### **3.3.1. Caractéristiques hydrauliques**

Les investigations hydrogéologiques et hydrochimiques ont permis de dégager le schéma de fonctionnement du système hydraulique. Les résultats principaux issus de ces investigations sont synthétisés ci-dessous.

#### **Niveau statique**

Les niveaux statiques mesurés en Juin varient de 2,8 à 46,2m. Les faibles profondeurs mesurées ( $<10\text{m}$ ) sont localisées dans la zone du dôme au SW, dans la zone avoisinante l'estuaire et le fleuve Saloum mais également le long des cours d'eau pérenne du Djikoye et du Baobalong. Sur une bande orientée SW-NE et partant de la zone du projet vers l'Est, la nappe devient de plus en plus profonde de 20 à plus de 45m. Ces tendances s'observent également avec les mesures effectuées en novembre 2016 après la saison des pluies.

#### **Piézométrie**

Les valeurs calculées du niveau piézométrie en Juin varient de + 25m dans la zone localisée au SW à -8m à l'extrême Est, au-delà de Kaffrine. Leur spatialisation sous ArcGis a permis de définir la morphologie globale de

l'écoulement où on note un dôme piézométrique à + 25m dans la zone avoisinante à Keur Samba Gueye au SW (Figure 15). Ce dôme piézométrique semble contrôler l'écoulement global du système vers toutes les directions et plus particulièrement vers un creux piézométrique bien marqué parallèle au cours d'eau du Saloum et qui part de Koumbal vers l'Est. Cette dépression piézométrique d'altitude négative par référence au 0 IGN jusqu'à -4m ne provient pas en réalité d'une exploitation accrue du système puisque les forages captant cette zone sont peu nombreux. Elles seraient probablement le fait des caractéristiques hydrauliques du système dans cette zone et plus particulièrement d'une reprise évaporatoire, comme décrite dans de nombreuses nappes en creux du CT en Afrique de l'Ouest. Il faut signaler également un dôme piézométrique de moindre importance localisé à Latmingue où l'altitude de la nappe atteint +17m. Ces variations de niveau qui traduisent l'effet de recharge saisonnière sont de l'ordre de 0,03 à +4,4m mais globalement elles sont dans de nombreux ouvrages entre 0,4 et 0,7m.

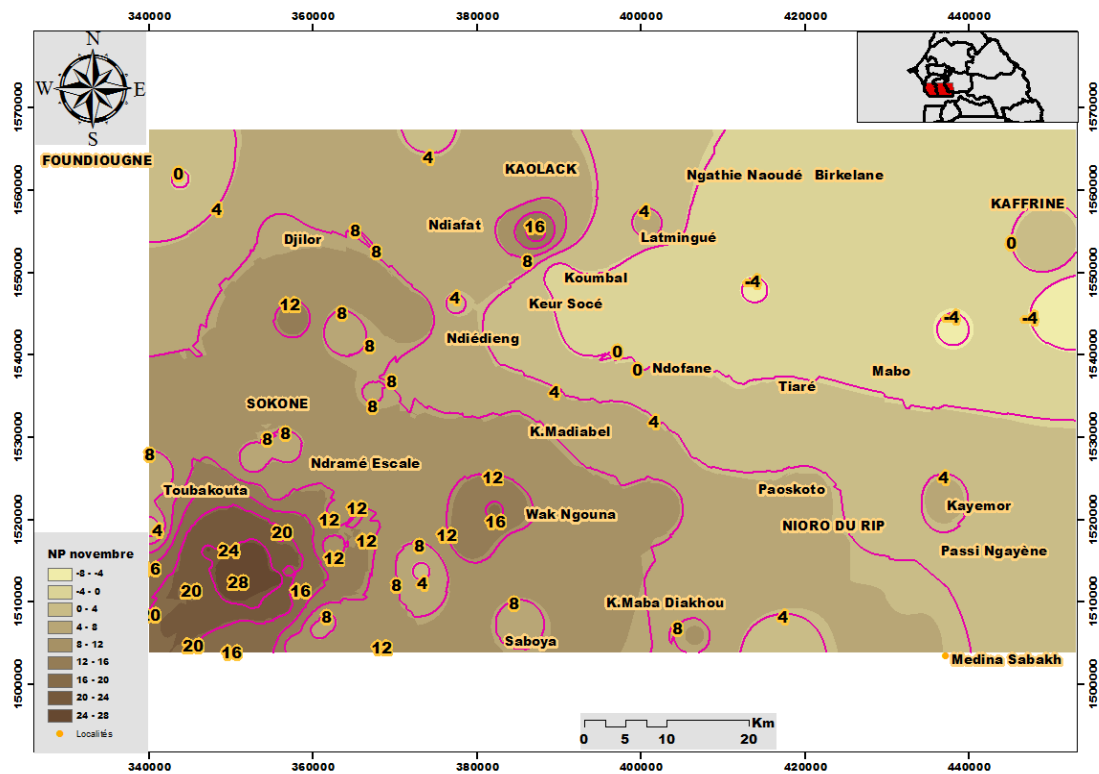


Figure 15: Niveau piézométrique Juin 2016

## Caractéristiques hydrauliques

Ces paramètres hydrauliques ont été essentiellement tirés de la banque des données PROGRES et évaluées à partir des rapports de forages. Les débits d'essai sont très variables de moins de  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  à plus de  $150 \text{ m}^3/\text{h}$  mais avec pour la grande majorité des forages testés des débits entre 30 et  $50 \text{ m}^3/\text{h}$ . les rabattements induits lors de ces essais ont permis d'évaluer les débits spécifiques qui varient suivant les zones de 1,3 à  $37 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$  avec une moyenne tournant autour de  $10 \text{ m}^3/\text{m}$ . les valeurs de transmissivité calculées sont de l'ordre de  $10^{-3}$  à  $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  avec une moyenne de  $2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ .

## Prélèvements

Le bilan des prélèvements provient de données obtenues exclusivement des relevés journaliers des débits pompés. Nous avons opté de recueillir les données de pompage sur 4 mois (Mars à Juin 2016) afin d'obtenir une moyenne journalière qui reflèterait au mieux le rythme de pompage. La figure 16 donne les moyennes journalières prélevées au niveau de chaque ouvrage. Elles varient de 17 à Sirmang à 1341 m<sup>3</sup>/j à Keur Madiabel avec une valeur moyenne de 361 m<sup>3</sup>/j. Le débit total prélevé au niveau des forages s'élève à 22,432 m<sup>3</sup>/j. il faut préciser que, presque tous ces forages desservent les villages et localités environnantes sur un réseau d'adduction pouvant atteindre 5 à 10 km de rayon. C'est une des raisons que les enquêtes sur les prélèvements au niveau des puits villageois n'ont pas pu être effectuées.

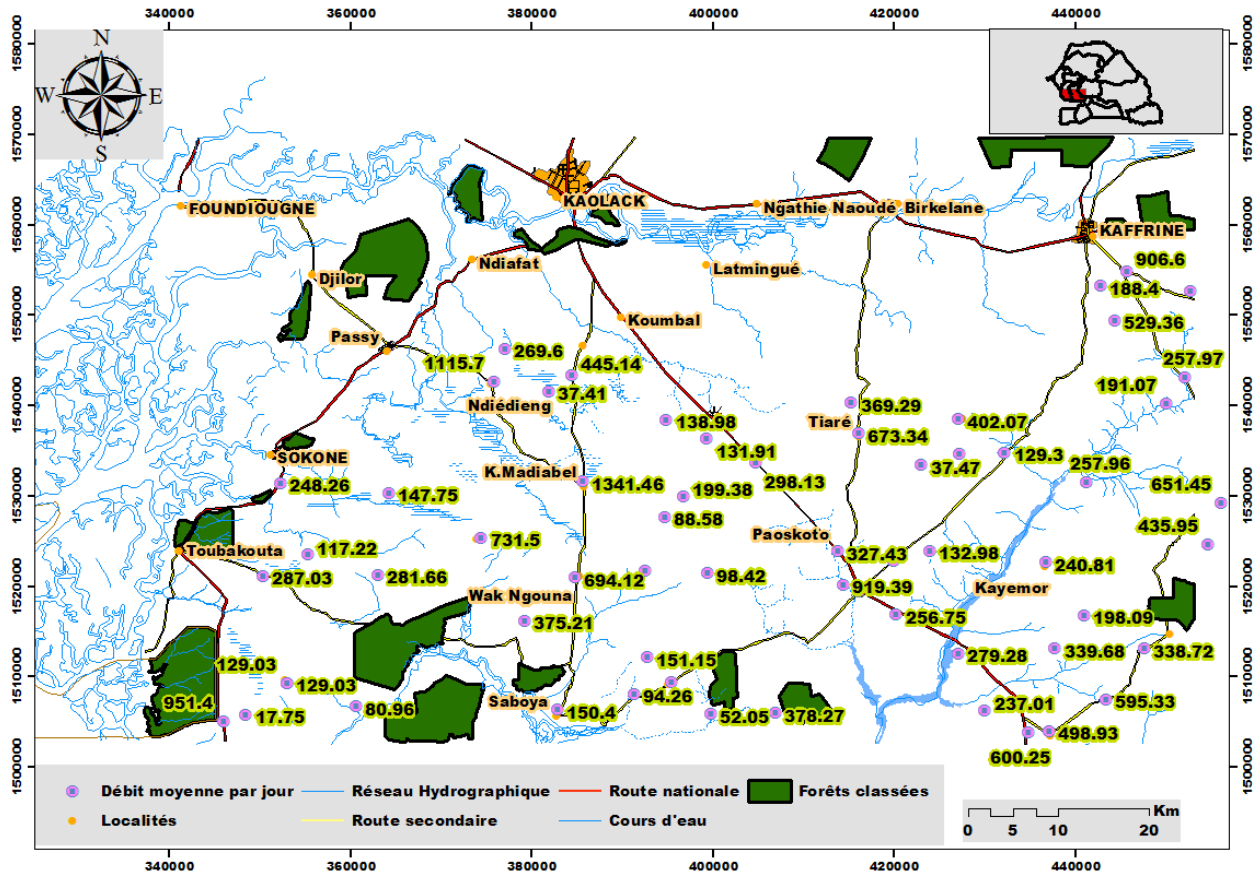


Figure 16: débit moyen d'exploitation journalier

## Sites potentiels d'implantation

Les zones d'implantations d'ouvrages identifiées comme sites potentiels pour le transfert ont été choisies en tenant compte plus particulièrement des valeurs de résistivités marquées à plus de 1000 ohm mais également de l'épaisseur de 60 à plus de 80m. Les valeurs élevées de résistivité (très faibles conductivités) dans un réservoir granulaire comme celui de la zone du projet traduisent à la fois un horizon sableux pur à très faiblement argileux (c'est à dire de bonne perméabilité) imbibé d'une eau très faiblement minéralisée. La zone la plus étendue se localise au centre de la zone du projet allant de Wack Gouna-Missira Saloum-Niassene Walo-Keur Mamour Dieng-Nioro-Darou Salam Nioro-Ndama ; elle est caractérisée du point de vue qualité par des eaux



faiblement minéralisées et les très faibles teneurs en chlorure témoignent d'une recharge importante dans cette zone. Les autres zones de valeurs de résistivités supérieures à 1000 ohm sont Nganda, Passi Toucouleur, Madina Sabakh, Gapakh et Saboya qui peuvent également fournir des débits importants. Toutefois, les valeurs de résistivité supérieures à 400 ohm dans la zone du dôme piézométrique sont prises en compte comme des sites potentiels.

Si l'on tient compte des puissances de l'aquifère en plus des valeurs de résistivité, le tableau ci-après identifie des sites potentiels dont beaucoup d'entre eux sont inclus dans la première analyse. C'est le cas de Ndiayène Moussa Ndiaye où un forage test a été réalisé. Le site de Keur Madiabel a été choisi comme site pour forage test du fait de la puissance d'aquifère. Le tableau 6 ci-après donne les sites potentiels pour l'implantation de 2 forages test.

Tableau 6: sites potentiels d'après puissance de nappe

Localité	SE	Profondeur Interprétative du CT
Ndiayene Moussa	SE1	122m
Keur Saloum Diané	SE14	93m
Niassene Walo	SE35	74m
Keur Tamba	SE33	105m
Kohel	SE52	170m
Médina Sabakh Nord	SE54	115m
Passi Toucouleur	SE59	135m
Keur Madiabel	SE22	129
Nganda	SE61	115m

## Réalisation d'ouvrages test

Pour rappel, dans le cadre de ce projet, 4 ouvrages (2 forages et 2 piézomètres) ont été prévus pour être réalisés par l'entreprise SENTER/PERFIBESA. Le choix des sites de Ndiayene Moussa Ndiaye et de Keur

Madiabel pour la réalisation des forages à gros diamètre a été retenu pour le futur transfert vers les îles du Saloum, Toubacouta, Nioro Alassane Tall, Passi, Kaolack. Pour les 2 nouveaux piézomètres, les sites de de Keur Samba Gueye (zone du dôme piézométrique) et de Keur Ali Bassine ont été retenus par les suivis respectifs du dôme piézométrique et de la progression di biseau salé au Nord de la zone du projet.

Les principaux résultats issus des travaux sont les suivants (tableaux 7 et 8):

- **Tableau 7: Forage test de Keur Ndiayene Moussa**

paramètres	<u>NS<sub>sol</sub></u>	<u>Prof</u>	<u>Qc</u>	<u>Qs</u>	<u>T</u>	<u>CE</u>	<u>pH</u>
valeurs	<u>7.37m</u>	<u>96m</u>	<u>Sup 242</u> <u>m3/h</u>	<u>6-7</u> <u>m3/h/m</u>	<u>1.6x10-2</u> <u>m2/s</u>	<u>67</u> <u>µS/cm</u>	8.4

- **Tableau 8: Forage test de Keur Madiabel**

paramètres	<u>NS<sub>sol</sub></u>	<u>Prof</u>	<u>Qc</u>	<u>Qs</u>	<u>T</u>	<u>CE</u>	<u>pH</u>
valeurs	<u>10.31m</u>	<u>115m</u>	<u>Sup</u> <u>120</u> <u>m3/h</u>	<u>4.4</u> <u>m3/h/m</u>	<u>2.14x10-</u> <u>2 m2/s</u>	<u>1360</u> <u>µS/cm</u>	6.5

- **Piézomètres nouveaux de Keur Samba Gueye et de Keur Ali Bassine**

Ces 2 ouvrages ont été développés à l'air lift mais n'ont pas encore fait l'objet de pompage d'essai. Le tableau 9 suivant donne les caractéristiques de ces ouvrages.

Tableau 9: Caractéristiques des piézomètres réalisés

Piézomètres	profondeur	crépine	NS/margelle	zone
Keur Samba Gueye	92 m	42-54 m 60-72m	15.17 m	Dôme piézométrique
Keur Ali Bassine	91 m	34-58 m	29.91 m	Biseau sale

Ci-après nous résumons les principaux résultats permettant d'établir le mode de fonctionnement traduit en modèle conceptuel.

Sur le plan hydrogéologique, l'aquifère du CT de puissances variables (30-120 m) selon les zones présente également des caractéristiques variables avec des valeurs de transmissivité de  $10^{-3}$  à  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s avec une moyenne de  $2,5 \cdot 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s et des débits spécifiques de 1 à 37 m<sup>3</sup>/h/m capable de fournir d'excellents débits à plus de 150 m<sup>3</sup>/h. L'écoulement de la nappe se fait grossièrement à partir de la zone de dôme piézométrique (+24 m) vers toutes les directions suivant un gradient hydraulique variable (dépendant de la transmissivité). Vers le Nord, une dépression piézométrique à -4m en moyenne qui s'étend selon une direction W-E d'altitude collecte l'écoulement de la nappe. Du fait de son caractère superficiel, la nappe bénéficie d'une recharge saisonnière induite par l'infiltration des eaux de pluie comme l'atteste les remontées de l'ordre de 0,03 à +4,4m (moyenne entre 0,4 et 0,7m) entre les deux campagnes de mesure effectuées. Toutefois, des études de recharge effectuées dans la région par différentes méthodes montrent des valeurs relativement élevées atteignant 101 mm/an. Les investigations par la méthode du bilan des chlorures à Nioro donnent des valeurs comprises entre 18 et 108 mm. Cette gamme de valeurs a été également trouvée avec la méthode de fluctuation de la nappe et celle de Thortnwaite où elles sont respectivement entre 20 et 93mm/an, et à 59 mm/an.

### **3.3.2. Caractéristiques hydrochimiques**

Les caractéristiques physico-chimiques et chimiques ont été évaluées sur 112 ouvrages lors de la 1<sup>ère</sup> campagne. Pour chaque ouvrage visité, les paramètres tels que le pH, CE, O2 dissous et température ont été mesurés in situ.

Les valeurs de température qui oscillent entre 26,5 et 38°C (moyenne = 30,8°C) reflètent le caractère superficiel de la nappe du CT où l'échange thermique se fait facilement à la faveur de la température ambiante. Les valeurs de pH par contre reflètent le caractère acide des eaux sur certains ouvrages oscillant entre 3,7 min et 7,9 maximum avec une moyenne de 6,1. Les valeurs de CE varient de 16,1 à Nioro à 5.033 µs/cm à Foundiougne avec une moyenne de 378 µs/cm et un écart type de 563 µs/cm (Figure 17, tableau 10). Les très faibles valeurs de CE <100 µs/cm sont localisées principalement au Sud de la zone d'étude. Il faut signaler que le réseau de points de mesures dans le contexte de la zone d'étude ne peut pas permettre une délimitation nette des zones de fortes valeurs dans la zone Nord, du fait que le nombre d'ouvrages présents y est très faible. Ces fortes valeurs dans ce secteur devraient nous renseigner sur l'extension du biseau salé à partir du fleuve Saloum. Pour la 2<sup>ème</sup> mission effectuée en novembre 2016, les valeurs de CE varient de 94,4 à Gapakh à 10.660 µs/cm à Foundiougne avec une valeur moyenne de 758 µs/cm et un écart type de 1356 µs/cm. En comparant la minéralisation entre les deux périodes, on remarque que les eaux après la saison de pluies sont faiblement plus minéralisées. Ceci pourrait découler du transit de l'eau d'infiltration vers la nappe qui lessive les sels de surface ; mais également une mobilisation des ions par réactions géochimiques lors du processus d'infiltration.

Tableau 10: statistique descriptive des paramètres physicochimiques en Juin

	pH	CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$	Température
Min	3.9	16.1	26.5
Max	7.9	5033.0	38.0
Moy	6.1	378.3	30.8
Ecart-type	0.8	563.4	1.6

Tableau 11: statistique descriptive des paramètres chimiques en Juin

	HCO <sub>3</sub>	CL	SO <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	Ca	Mg	Na	K
Min	6.1	3.2	0.0	0.0	2.2	0.2	1.7	0.1
Max	756.4	1532.2	390.8	192.5	248.3	94.8	853.7	81.7
Moy	113.2	127.3	20.3	26.8	36.0	9.7	80.7	4.7
ET	140.2	285.7	67.6	49.6	48.0	18.2	180.6	11.8

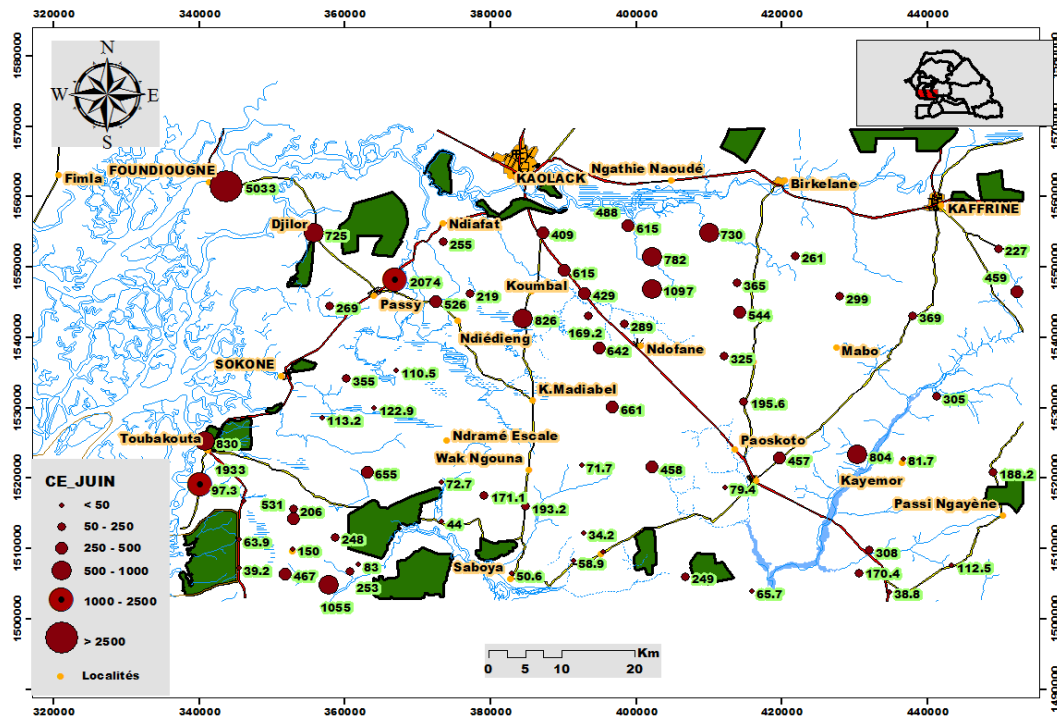


Figure 17: distribution des valeurs de CE mesurées en Juin

Des analyses chimiques effectuées sur les ions majeurs et quelques éléments mineurs tels que le Fluor ( $F^-$ ) et le Fer ( $Fe$ ) sur les 54 points distribués spatialement sur la zone du projet, montrent qu'au-delà des zones contaminées par l'intrusion saline, les eaux de très bonne qualité où les teneurs en ions en-deçà des normes de potabilité de l'OMS. Le tableau 11 de données statistiques présente les valeurs minimales, maximales, moyennes et d'écart type. Dans les zones contaminées par l'intrusion saline, les concentrations en ions sont élevées avec des valeurs de CE  $> 1000 \mu S/cm$ , de Cl variant de 250 à  $1500 \mu S/cm$  et de Na de 120 à 853 mg/l. Les valeurs de  $SO_4^{2-}$  sont également exceptionnellement élevées dans ces zones de 28 à 300 mg/l. Les teneurs en fluor sont également élevées au niveau de certains puits à eau saumâtre et varient de 2,5 à 3,5 mg/l ; dépassant de loin la norme de 1,5 mg/l. les teneurs en Fer par contre sont relativement faibles  $< 0,3$  mg/l à l'exception de certains ouvrages où les valeurs oscillent entre 0,4 et 2,38 mg/l.

Les types d'eau identifiés sont majoritairement de faciès Na-Cl, Ca-HCO<sub>3</sub>, Ca/Mg-HCO<sub>3</sub> et mixtes (Figure 18). Ce diagramme à l'exception de 2 points montre que la majeure partie des eaux sont chlorurées et bicarbonatées.

Les distributions des teneurs en Cl (Figure 19) et NO<sub>3</sub> (Figure 20) sont prises en compte dans l'analyse pour évaluer les phénomènes de recharge, de contamination anthropique et d'intrusion saline. Elles mettent en évidence une certaine zonation orientée dans la direction W-E avec :

- La zone Sud caractérisée par des teneurs en Cl relativement faibles < 10 mg/l. Ces très faibles teneurs reflètent une infiltration plus importante dans cette zone si l'on tient compte du caractère conservatif de l'ion.
- La zone centre où les teneurs varient de 10 à 100 mg/l à l'exception des sites de Keur Madiabel caractérisées par des teneurs respectives de 241 et 321 mg/l, représentant des pôles à eaux saumâtres identifiées par la géophysique.
- La zone Nord qui s'étend sur la frange de l'estuaire vers Nema Ba où les teneurs en Cl sont élevées du fait de la contamination saline par les eaux du Saloum et de l'estuaire;
- Les teneurs en NO<sub>3</sub> qui expriment le degré de contamination anthropique sont très faibles à l'échelle du bassin à l'exception de quelques ouvrages (50 à 192 mg/l) qui sont inégalement distribués dans le système. Ces ouvrages qui sont majoritairement des puits sont certainement le fait de pollution ponctuelle à l'endroit des ouvrages. Il faut signaler que les activités domestiques et pastorales autour des puits sont très intenses et le défaut de protection (dalle et enclos de protection) pourrait fortement permettre une percolation des eaux de pluies vers la nappe.

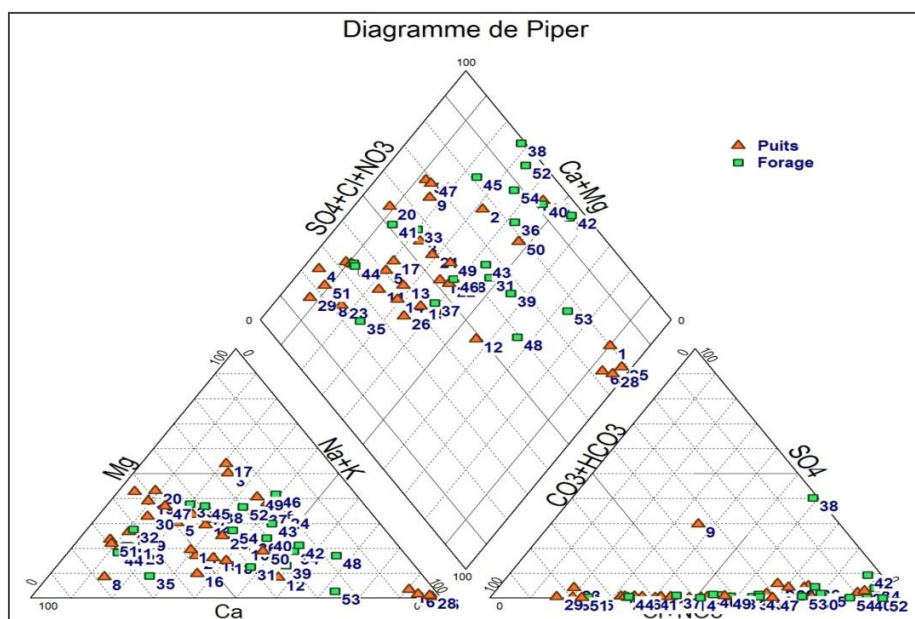


Figure 18: diagramme de Piper représentant les faciès chimiques

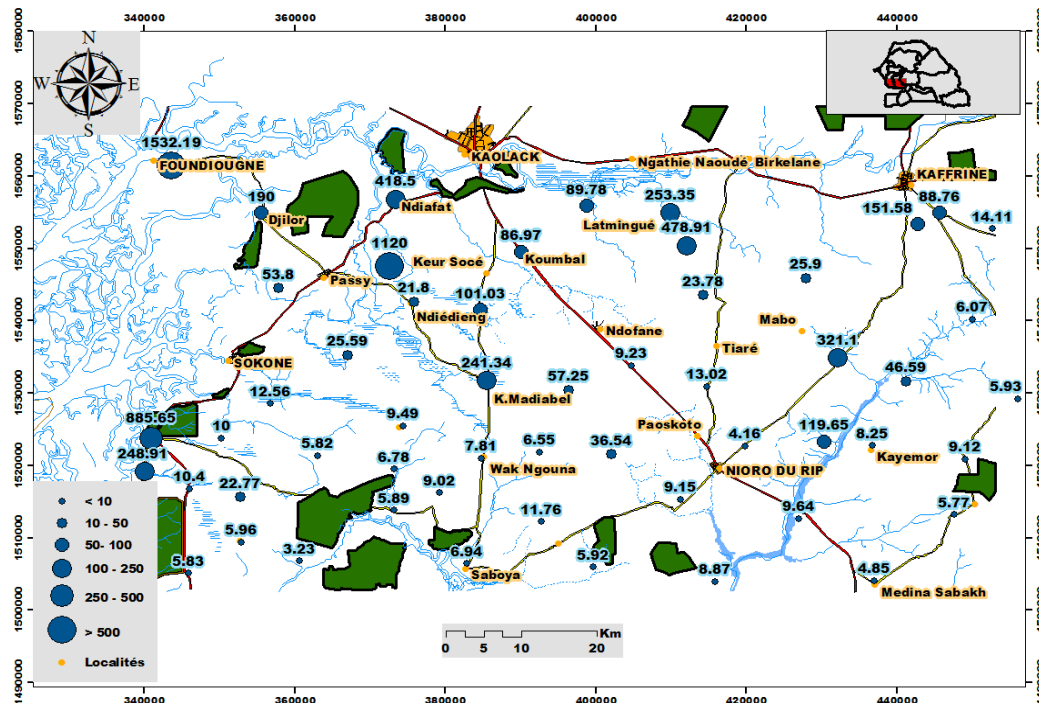


Figure 19: distribution des teneurs en chlorure Juin 2016



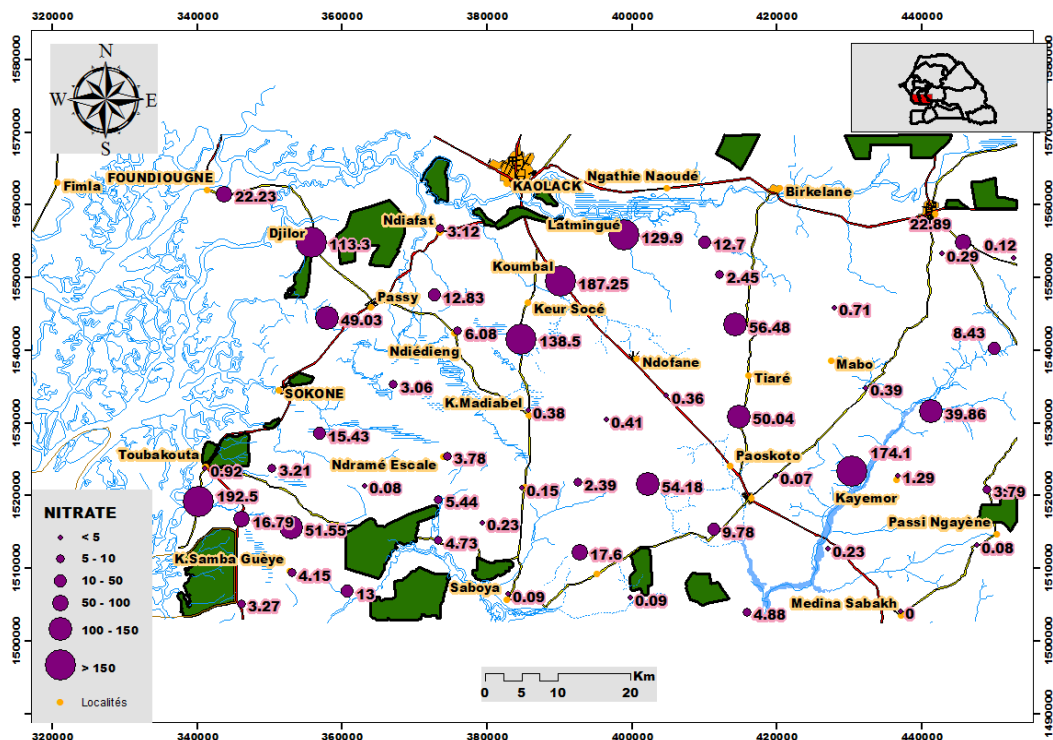


Figure 20: distribution des teneurs en nitrates Juin 2016

En conclusion, les caractéristiques physico chimiques et chimiques obtenues lors des investigations montrent une nappe de qualité excellente à l'exception des points d'eau localisés à la lisière du fleuve Saloum et de l'estuaire mais également de points d'eau contaminés localement par les activités domestiques et/ou pastorales autour des puits.

A terme, il s'agit à travers ces différents éléments de dégager le modèle conceptuel qui traduit le fonctionnement hydrodynamique du système qui est utilisé lors la phase d'implémentation, de calage et d'exploitation. Le chapitre qui suit reprend les conclusions du fonctionnement du système hydraulique précédemment décrit.

### 3.4. Modélisation du système et évaluation des potentiels exploitables

#### 3.4.1. Définition du modèle conceptuel

Les grandes lignes du modèle conceptuel sont présentées dans le rapport R3 de synthèse des investigations hydrologiques et hydrogéologiques. Elles sont reprises comme telles dans le logiciel Visual Modflow selon un maillage de 1000x1000m utilisé dans le cadre de ce projet:

L'extension proposée est comprise entre le fleuve Gambie au sud, le fleuve Saloum au nord, l'océan à l'ouest et la limite du domaine modélisé à l'est (Figure 21).

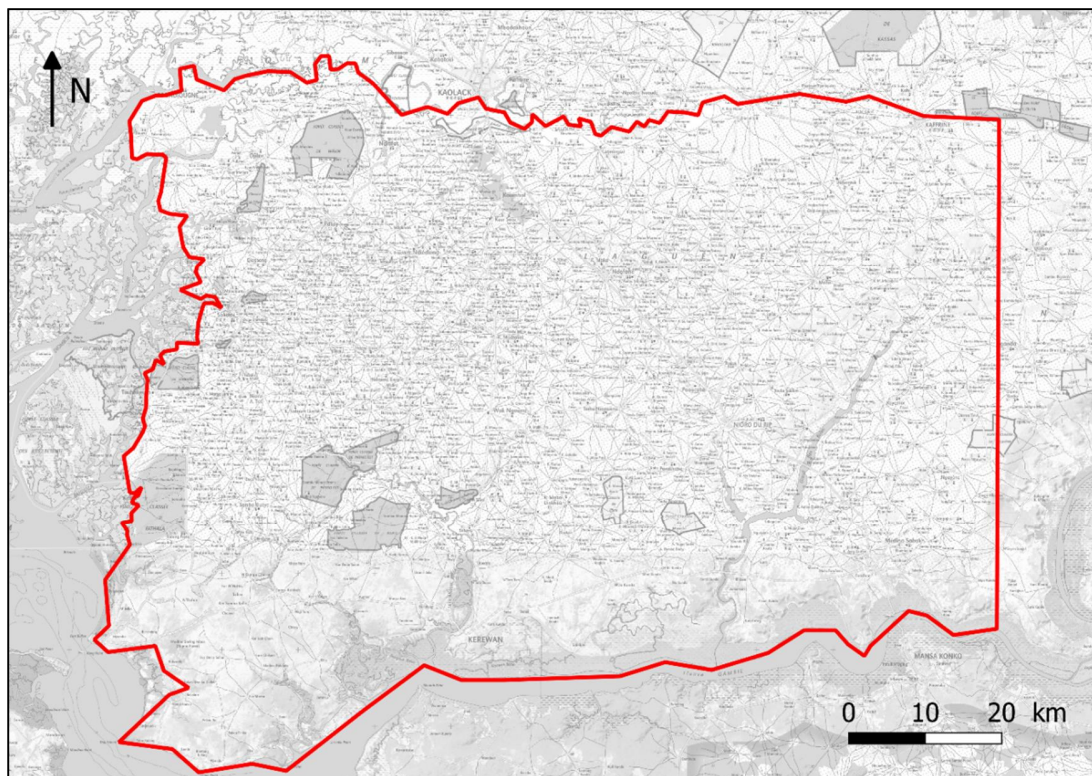


Figure 21: Extension du modèle hydrogéologique de l'aquifère du Continental Terminal

Pour la modélisation des écoulements souterrains, un aquifère monocouche est simulé, qui correspond aux formations aquifères du Continental Terminal, reposant sur les formations peu perméables de l'Éocène et du Paléocène qui séparent le Continental Terminal du Maastrichtien sous-jacent.

Les conditions aux limites ont été définies dans la modélisation conceptuelle :

- Au nord, le long du fleuve Saloum, des charges imposées sont fixées à partir des côtes du fleuve lues sur la carte IGN, et interpolées linéairement entre l'amont et l'aval.
- A l'ouest sur la bordure littorale, des charges imposées à 0 m sont fixées, selon le niveau de la mer.
- Au sud, le long du fleuve Gambie, des charges imposées à 0 m également sont fixées.
- Sur la bordure est du modèle, les conditions aux limites correspondent à des limites à flux nul. En effet l'aquifère du Continental Terminal s'étend au-delà de cette limite, mais celle-ci peut être considérée comme n'apportant pas d'eau à la partie de l'aquifère étudiée.

Cependant après avoir testé ces conditions et étant donné les scénarios d'exploitation prévus pour la suite, et en particulier la proximité des champs captant de Simon Diene et de Ndiayene Moussa avec la zone littorale, la condition à la limite sur la bordure ouest du modèle a été modifiée. La charge imposée à 0 m sur cette limite a été remplacée par une limite de type « General Head Boundary ». Ce type de condition à la limite proposée par le logiciel Modflow est plus souple que les charges imposées, et permet de représenter la présence d'une condition de charge imposée située à une certaine distance de la limite géographique du modèle. Ce cas de figure correspond donc bien à la limite ouest du modèle, avec la présence de l'océan à une distance de 10 à 15 km vers l'ouest, et des niveaux piézométriques mesurés le long de la limite compris entre 1 et 4 m.

Les paramètres de la limite de type « General Head Boundary » sont :

- La charge de référence au niveau de la source externe. Ici elle correspond à la charge piézométrique au droit de l'océan et est donc prise égale à 0 m.
- La conductance qui dépend des perméabilités des terrains entre la source externe et la bordure du modèle. Ici une valeur de 1000 m<sup>2</sup>/jour a été ajustée afin de reproduire les valeurs de charges piézométriques mesurées le long de la bordure ouest du modèle.

### Prise en compte des prélèvements

Les prélèvements en eau par les puits et forages captant l'aquifère du Continental Terminal ont été intégrés sur la base des données compilées dans le rapport R3. Les débits de pompage imposés correspondent aux débits moyens journaliers d'exploitation en m<sup>3</sup>/jour. L'ensemble des pompages à l'aquifère du Continental Terminal pris en compte dans le modèle représente un débit total de 860 m<sup>3</sup>/h.

### Régime hydrodynamique

En l'absence de suivi piézométrique continu au cours du temps, le modèle sera calé en régime hydrodynamique permanent. Un régime hydrodynamique permanent correspond à une absence d'évolution au cours du temps, et permet de modéliser le comportement d'un système à l'équilibre, avec des sollicitations invariables en entrées et sorties d'eau. Le modèle développé pourra par la suite être exploité en régime transitoire, c'est-à-dire en prenant en compte la dimension temporelle, afin d'évaluer l'impact d'une exploitation par de nouveaux pompages.

### **3.4.2. Résultat du calage du modèle hydrogéologique**

#### **Données de calage**

Les données de calage sont constituées par les mesures piézométriques de la campagne de juin 2016. En effet, pour un calage en régime permanent, ces mesures sont les plus pertinentes car elles correspondent à la fin de la saison sèche, avant que n'intervienne l'influence sur l'aquifère de la recharge, qui comporte un caractère transitoire marqué.

La qualité du calage sera évaluée en comparant les mesures piézométriques de juin 2016 aux valeurs de charges piézométriques simulées par le modèle aux mailles où sont situés les piézomètres.

#### **Répartition des perméabilités calées**

La figure 22 suivante présente la répartition spatiale des perméabilités calées sur l'extension du modèle.

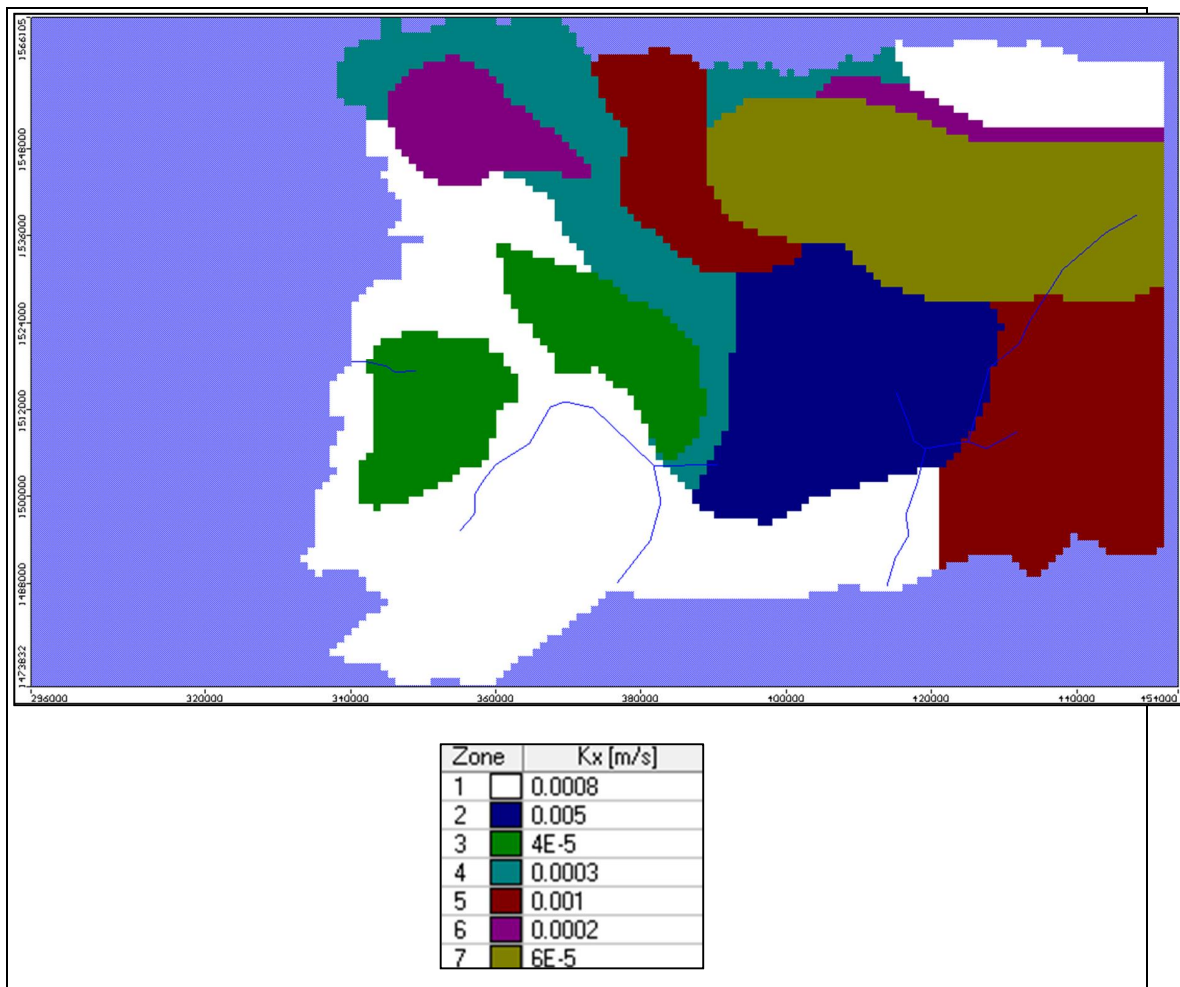


Figure 22: Répartition des perméabilités calées dans le modèle Visual Modflow

Les valeurs calées sont comprises entre  $4 \cdot 10^{-5}$  m/s et  $5 \cdot 10^{-3}$  m/s, les perméabilités les plus faibles se trouvant en partie ouest du modèle, et les perméabilités les plus élevées en partie centrale entre la rivière Djikoye et le Bao Bolon. Ces valeurs sont cohérentes avec celles déduites de pompages d'essai dans l'aquifère du Continental Terminal.

### Répartition de la recharge et de l'évapotranspiration

La répartition de la recharge calée respecte un gradient sud-ouest - nord-est avec une diminution des valeurs de recharge selon cet axe. La recharge



maximale simulée au sud s'élève à 60 mm/an et la recharge minimale correspond à la zone de dépression piézométrique au nord-est du modèle et a une valeur de -15 mm/an. Cette valeur négative permet d'indiquer une forte reprise évaporative à la nappe dans ce secteur.

La carte suivante (Figure 23) présente la répartition des zones de recharges homogènes dans le modèle, et le tableau 12 suivant présente les valeurs de recharge associées pour chaque zone.

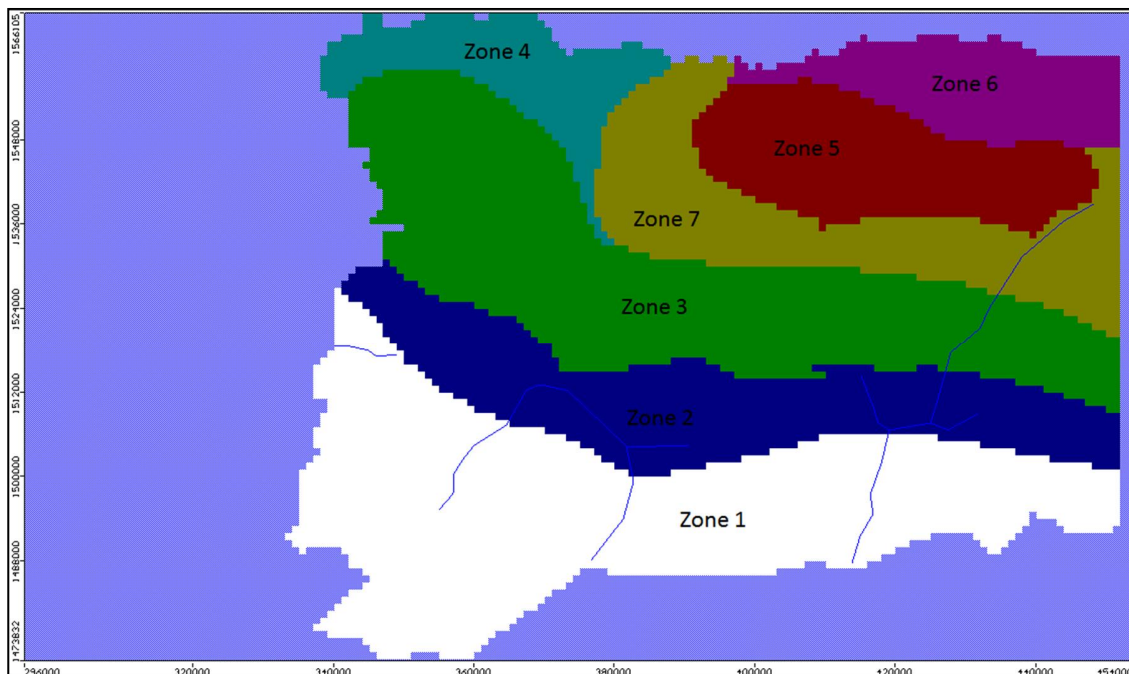


Figure 23: Répartition des zones de recharge sur l'extension du modèle

Tableau 12: Valeurs de recharge annuelle calées dans le modèle

Zone de recharge	Recharge annuelle (mm/an)
1	60
2	50
3	40
4	20
5	-15
6	10
7	5

Une reprise évaporative supplémentaire a été introduite sur l'ensemble du modèle, via le paramètre « Evapostranspiration » de Visual Modflow. Ce paramètre permet de simuler une reprise évaporative à la nappe dont la valeur dépend de la profondeur du toit de la nappe libre, et évolue linéairement en fonction de cette profondeur. Une profondeur maximale d'évaporation de 20 m a été utilisée, et une évaporation annuelle maximale de 20 mm a été fixée. Ceci signifie que l'évaporation simulée est de 20 mm/an si le toit de la nappe se trouve à une profondeur nulle, et qu'elle diminue linéairement jusqu'à 0 mm/an pour des profondeurs du toit de la nappe comprises entre 0 et 20 m. Pour une profondeur du toit de la nappe supérieure à 20 m, la reprise évaporative simulée est nulle.

#### Piézométrie calculée par le modèle

La figure 24 suivante présente la piézométrie simulée sur l'ensemble du modèle, ainsi que les points de mesures avec les charges observées en juin 2016.



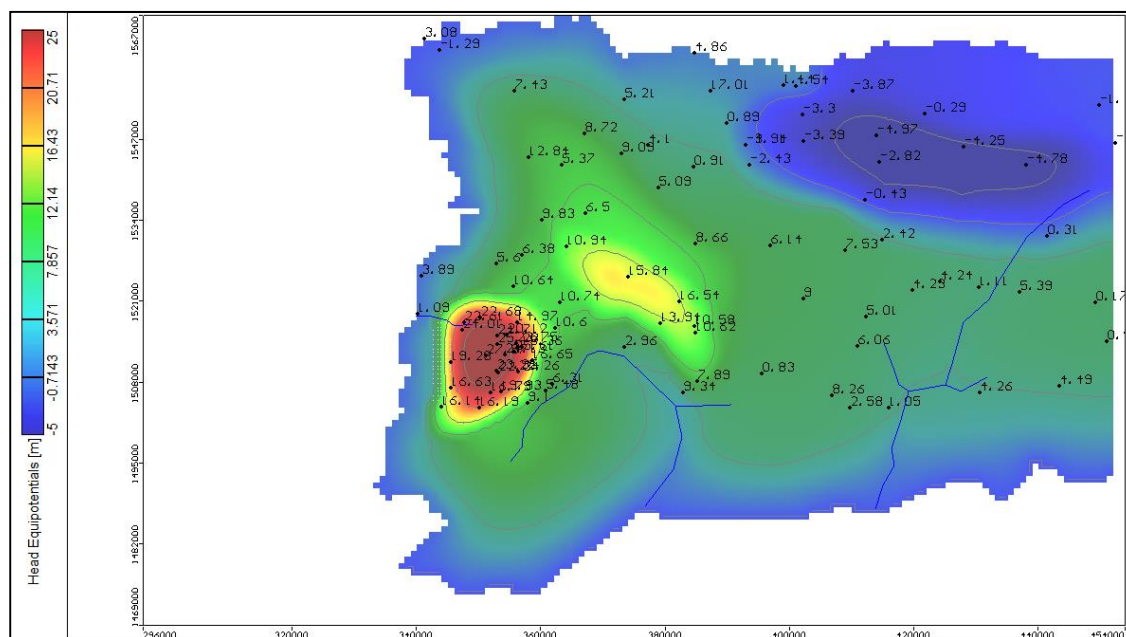


Figure 24: Niveaux piézométriques simulés par le modèle Visual Modflow et niveaux piézométriques mesurés aux points d'observation

La figure 25 représente le graphique de comparaison entre charges simulées et charges observées pour l'ensemble des points de suivi. Les indicateurs statistiques de calage sont indiqués en bas de la figure.

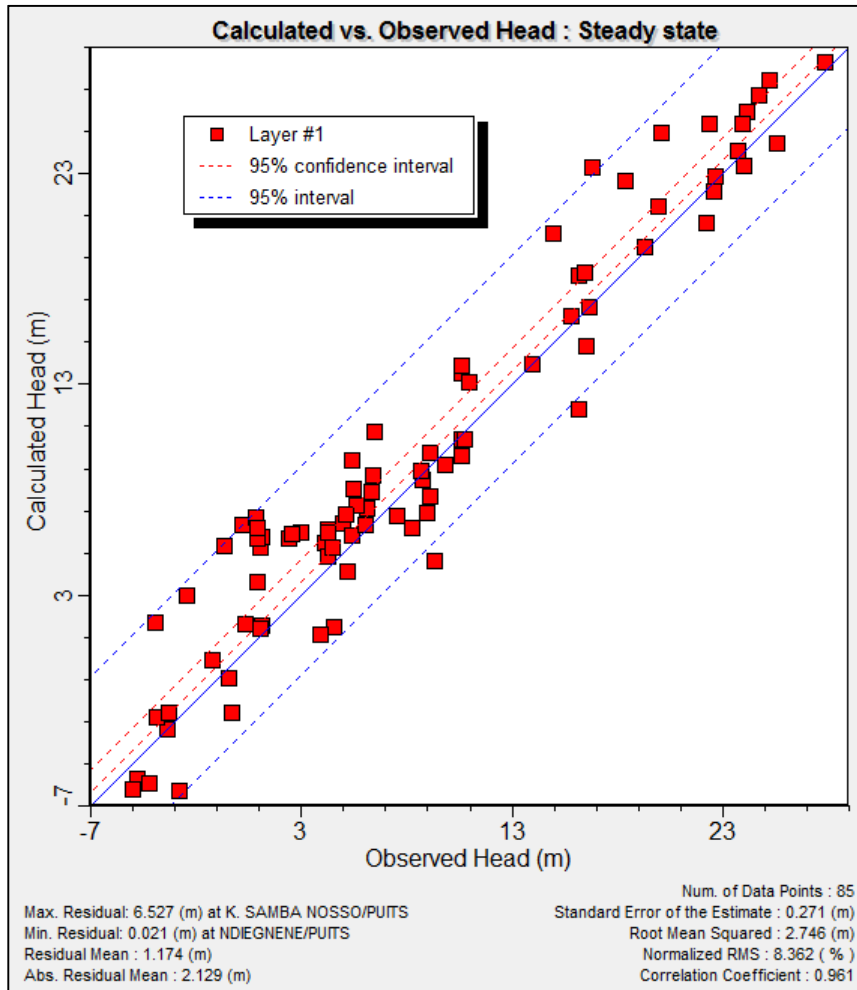


Figure 25 : Comparaison des charges simulées et des charges observées aux points de mesures piézométriques et statistiques des erreurs de calage

L'écart moyen entre charges simulées et charges observées est de 1,17 m, alors que l'écart absolu moyen est de 2,13 m. Ces valeurs traduisent un calage de qualité satisfaisante au regard de la variabilité spatiale des niveaux mesurés et des gradients piézométriques observés mais également des ouvrages de suivi utilisés. La carte de la figure 25 fait apparaître que l'allure générale de la piézométrie est bien reproduite par le modèle, ce qui permet d'obtenir une bonne représentation des directions d'écoulement générales de l'aquifère.

### Débits d'exhaure dans les cours d'eau

Les débits d'exhaure de l'aquifère du Continental Terminal dans les cours d'eau sont simulés par la mise en œuvre de drains au droit des cours d'eau mentionnés ci-avant. Le tableau 13 résume les débits de décharge de la nappe simulés dans les différents cours d'eau : Ces valeurs représentent des débits de base moyens de ces cours d'eau, et sont bien dans des ordres de grandeurs compatibles avec les données hydrologiques disponibles.

Tableau 13: Débits d'exhaure simulés de la nappe vers les cours d'eau

Cours d'eau	Débits de décharge de la nappe (m <sup>3</sup> /s)
Nema	2,45.10 <sup>-3</sup>
Djikoye	1,29
Bao Bolon	1,09

### Bilans hydrodynamiques

Les bilans en eau du modèle s'établissent de la façon suivante pour le régime permanent calé :

Tableau 14: Termes du bilan hydrodynamique du modèle Visual Modflow calé

Terme du bilan	Entrée d'eau (m <sup>3</sup> /jour)	Sortie d'eau (m <sup>3</sup> /jour)	Entrée d'eau (%)	Sortie d'eau (%)
Charges imposées	6 772	275 824	0,81	32,99
Limite « GHB »	0	140 405	0,00	16,79
Prélèvements	0	20 643	0,00	2,47
Drains	0	206 747	0,00	24,73
Evapotranspiration	0	159 439	0,00	19,07
Recharge	829 245	32 959	99,19	3,94

Les entrées d'eau dans l'aquifère du Continental Terminal modélisé se font quasi-exclusivement par la recharge, avec moins de 1 % des entrées qui proviennent de la limite à charge imposée située en partie amont du fleuve Saloum.

Les sorties d'eau de l'aquifère se font pour 50 % par les limites à charges imposées et la limite de type General Head Boundary : pour 61 % par la limite sur le fleuve Gambie, pour 34 % par la limite ouest le long du littoral, et pour 5 % par la limite au droit du fleuve Saloum (partie aval du fleuve).

Les autres sorties d'eau sont constituées en premier lieu par les drains (25 %), c'est-à-dire les trois rivières Bao Bolon, Djikoye et Nema représentées de cette manière dans le modèle, par l'évapotranspiration (23 %), et enfin par les prélèvements qui ne représentent que 2,5 % des sorties d'eau.

Ces bilans permettent d'établir un état de la ressource en eau disponible dans l'aquifère du Continental Terminal sur la zone d'étude. Ces résultats sont cependant fortement liés à la densité des données qui ont permis de caler les

paramètres du modèle hydrogéologique, et une forte incertitude leur est associée.

Le fait de disposer à l'avenir de données de suivi temporel de l'aquifère permettrait d'améliorer la fiabilité de cet outil de gestion, grâce à un calage en régime transitoire, et ainsi de consolider les résultats des calculs qui en seront issus.

### **3.4.3. Simulations de scénarios d'exploitation de l'aquifère**

#### **3.4.3.1. Localisation des champs captant et Définition des scénarios**

Trois champs captant ont été pris en compte en accord avec la pour être mis en exploitation à court ou moyen terme, afin de réaliser le transfert d'eau de bonne qualité vers les zones en déficit :

- Le champ captant de Simon Diene pour le transfert vers les îles du Saloum,
- Le champ captant de Ndiayene Moussa pour le transfert vers les localités de Passi et Foundiouné,
- Le champ captant de Keur Madiabel pour le transfert vers Kaolack.

Les 5 forages du champ captant de Simon Diene sont déjà existants et ont été testés dans le cadre d'une précédente étude.

Les emplacements des champs captant de Ndiayene Moussa et de Keur Madiabel ont été proposés sur la base des investigations et des synthèses de données réalisées dans le cadre de la présente étude. Dans chacune de ces zones, un forage de test a également été créé dans le cadre de cette étude et des essais par palier et de longue durée ont été menés et interprétés. Ces

forages ont permis de vérifier les potentialités de l'aquifère du Continental Terminal dans ces secteurs.

Les emplacements des forages proposés pour Ndiayene Moussa et Keur Madiabel sont donc des emplacements prévisionnels et ne correspondent pas à des forages existants, sauf pour les forages « ND » à Ndiayene Moussa, et « KM2 » à Keur Madiabel

La figure 26 présente la localisation des forages de ces trois champs captant.

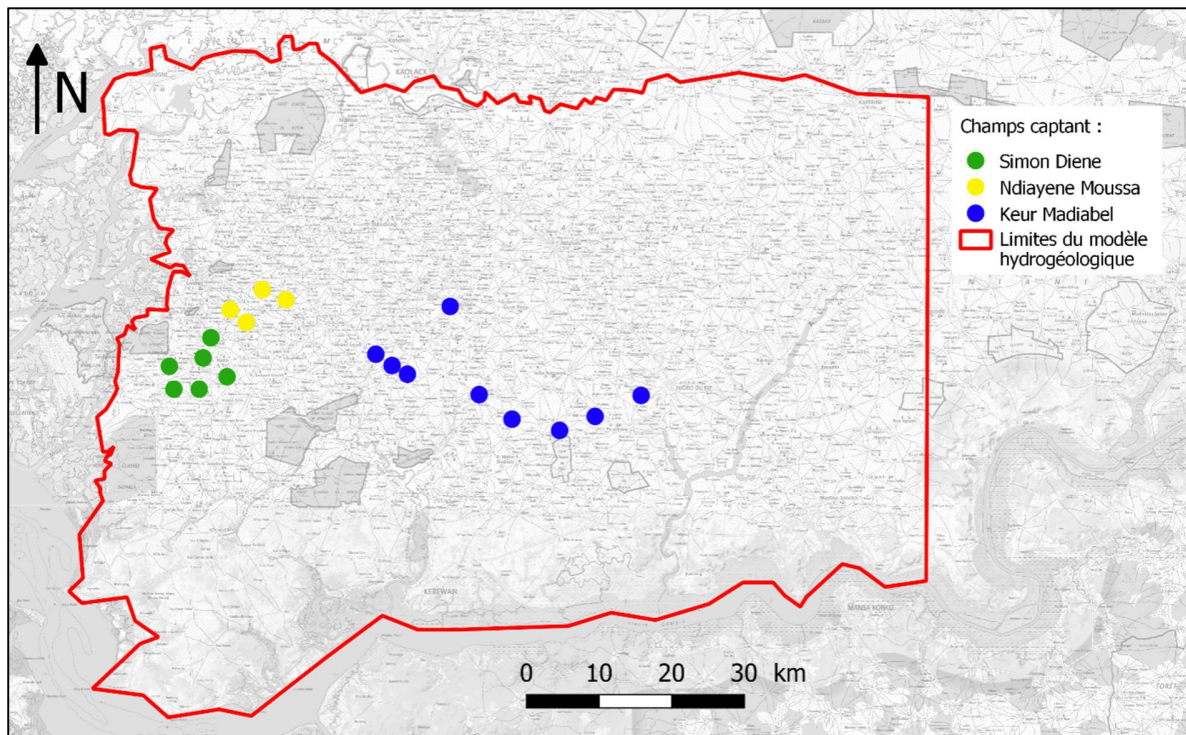


Figure 26: Localisations proposées pour les trois champs captant à tester

### Objectifs de volumes journaliers

Les objectifs de volumes journaliers définis par la DGPRE pour les trois champs captant sont les suivants :

- Simon Diene : 3200 m<sup>3</sup>/jour,
- Ndiayene Moussa : 4000 m<sup>3</sup>/jour,

- Keur Madiabel : 7000 m<sup>3</sup>/jour.

Ces objectifs sont des minimums à atteindre pour assurer un transfert d'eau suffisant. Des volumes plus importants pourront être proposés si les potentialités mises en avant par la modélisation le permettent.

Les débits unitaires retenus par forage de chaque champ captant sont définis à partir des potentialités connues et des tests de pompage réalisés dans le cadre de ce projet.

Les débits moyens d'exploitation utilisés dans les simulations de scénario pour ces deux champs captant seront donc inférieurs à 100 m<sup>3</sup>/h.

### Scénarios simulés

#### Scénario 1

Dans ce premier scénario, le champ captant de Simon Diene est mis en œuvre avec des pompes sur les 5 forages existants (tableau 15 et figure 27).

Tableau 15: Débits simulés par forage pour le scénario 1

Forage	Débit (m <sup>3</sup> /h)
F01	20
F02	30
F03	20
F04	40
F06	50

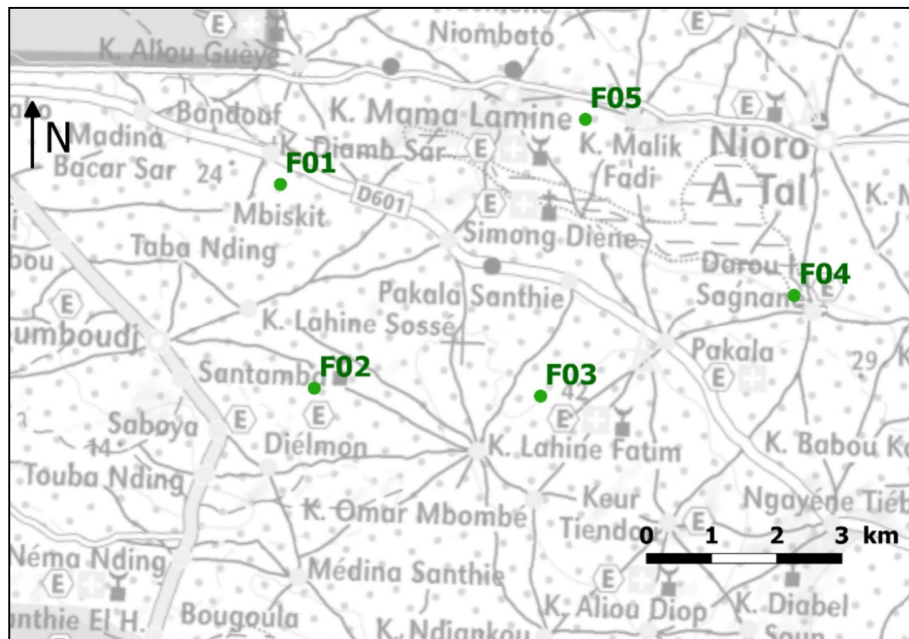


Figure 27: Localisation des forages du champ captant de Simon Diene



## Scénario 2

Ce second scénario a consisté à simuler la mise en œuvre des pompages aux 4 forages du champ captant de Ndiayene Moussa dont un déjà réalisé (« ND »). Pour les 3 autres forages, les emplacements proposés sont prévisionnels et basés sur les résultats des investigations réalisées. Le tableau 16 présente les débits retenus et la figure 28 présente la localisation des 4 forages du champ captant.

Tableau 16: Débits simulés par forage pour le scénario 2

Forage	Débit (m <sup>3</sup> /h)
Ndiayene Moussa	70
Nd1	70
Nd2	70
Nd3	40

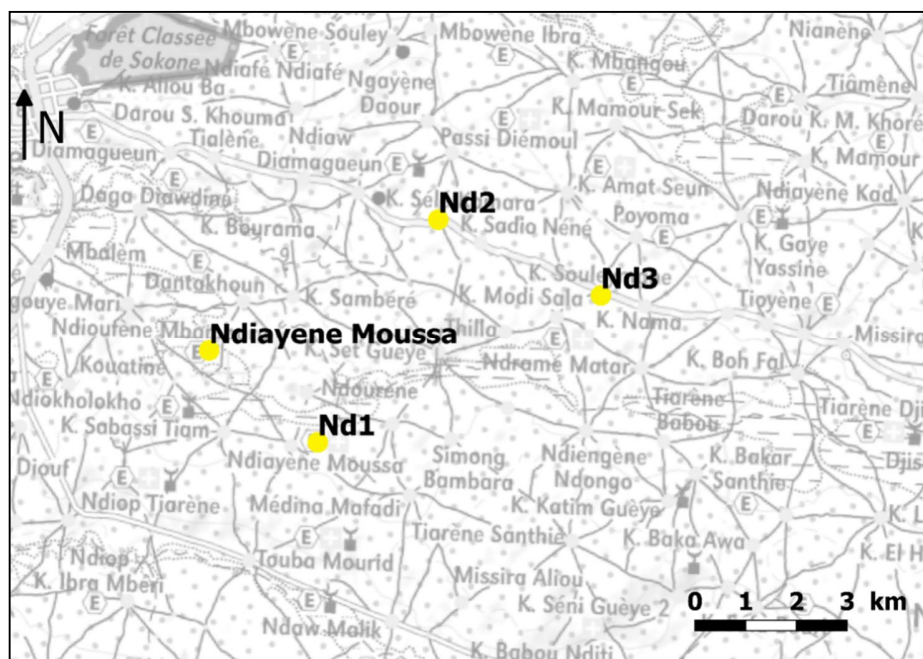


Figure 28 : Localisation prévisionnelle des forages du champ captant de Ndiayene Moussa.

### Scénario 3

Le troisième scénario correspond à la mise en œuvre simultanée des champs captant de Simon Diene et de Ndiayene Moussa. Les emplacements des forages simulés sont donc les mêmes que pour les scénarios 1 et 2.

Les débits retenus sont identiques à ceux des scénarios 1 et 2, à l'exception du forage F01 où le débit a été réduit afin de maintenir un niveau piézométrique non problématique.

Le tableau 17 récapitule les débits simulés par forage pour ce scénario.

Tableau 17: Débits simulés aux 9 forages pour le scénario 3

Champ captant	Forage	Débit (m <sup>3</sup> /h)
Simon Diene	F01	15
	F02	30
	F03	20
	F04	40
	F06	50
Ndiayene Moussa	Ndiayene Moussa	70
	Nd1	70
	Nd2	70
	Nd3	40

#### Scénario 4

Le quatrième scénario correspond au fonctionnement simultané des 3 champs captant de Simon Diene, de Ndiayene Moussa et de Keur Madiabel.

Les débits simulés aux forages de Simon Diene et de Ndiayene Moussa sont identiques à ceux du scénario 3. Les débits simulés aux forages de Keur Madiabel ont été ajustés à partir des débits maximums d'exploitation indiqués précédemment, en fonction des rabattements simulés dans les simulations tests.

Le tableau 18 récapitule les débits simulés par forage aux trois champs captant, et la figure 29 présente la localisation des 9 forages du champ captant de Keur Madiabel.

Tableau 18: Débits simulés aux 18 forages pour le scénario 4

Champ captant	Forage	Débit (m <sup>3</sup> /h)
Simon Diène	F01	15
	F02	30
	F03	20
	F04	40
	F06	50
Ndiayene Moussa	Ndiayene Moussa	70
	Nd1	70
	Nd2	70
	Nd3	40

Keur Madiabel	KM2	70
	KM3	70
	KM4	70
	KM5	70
	KM6	70
	KM7	70
	KM8	70
	KM9	70
	KM10	70

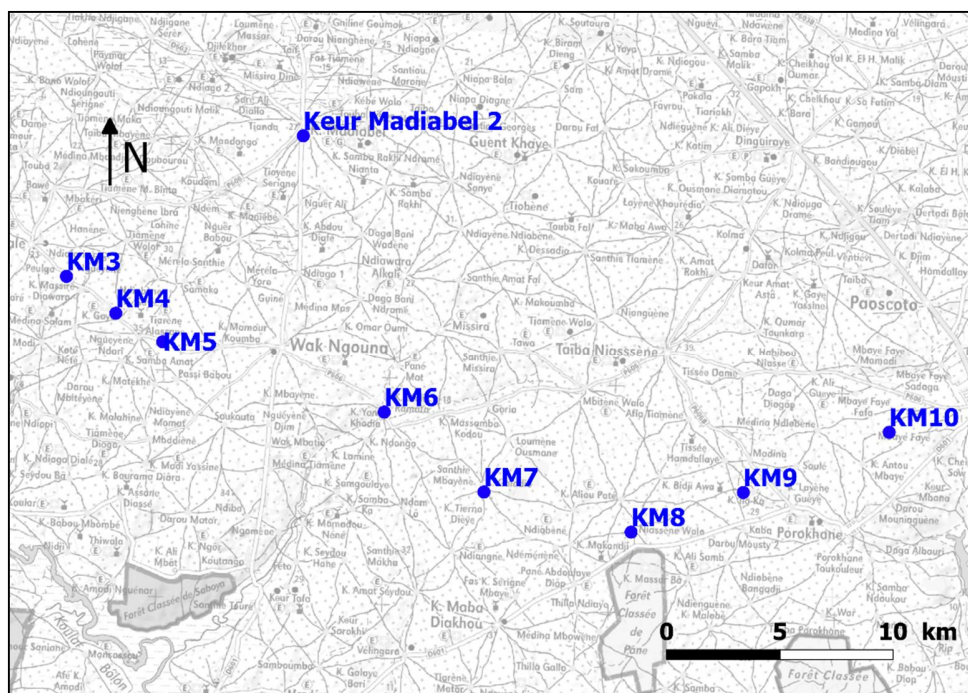


Figure 29: Localisation prévisionnelle des forages du champ captant de Keur Madiabel

### **Scénario 5**

Le cinquième scénario est une adaptation du scénario 4 avec des débits d'exploitation plus élevés de 25 % environ. Les positions des forages sont identiques à celles du scénario 4.

L'objectif de ce scénario est d'évaluer la capacité de l'aquifère à fournir des volumes journaliers plus importants que ceux proposés dans les scénarios précédents. Le caractère faisable de ce scénario dépend en grande partie des caractéristiques des ouvrages qui ne sont pas connues à ce jour pour les forages à créer.

Le tableau 19 récapitule les débits simulés par forage aux trois champs captant pour le scénario 5 :

Tableau 19: Débits simulés aux 18 forages pour le scénario 5

Champ captant	Forage	Débit (m <sup>3</sup> /h)
Simon Diene	F01	20
	F02	40
	F03	25
	F04	50
	F06	60
Ndiayene Moussa	Ndiayene Moussa	90
	Nd1	90
	Nd2	90
	Nd3	50
Keur Madiabel	Keur Madiabel 2	90
	KM3	90
	KM4	90
	KM5	90
	KM6	90
	KM7	90
	KM8	90
	KM9	90
	KM10	90



## Régime et durée des simulations

Les simulations des 4 scénarios ont été faites en régime permanent et en régime transitoire.

Les simulations en régime permanent permettent de simuler le fonctionnement du système à long terme, après stabilisation des rabattements et d'envisager ainsi l'impact maximum des pompages, dans une perspective de recharge et de conditions aux limites inchangées.

Les simulations en régime transitoire sont faites sur une durée de 40 ans environ. Les nouveaux pompages des champs captant à créer sont mis en fonctionnement en début de simulation, afin d'évaluer la progression de l'impact de ces pompages sur la nappe, et le temps d'atteinte d'un régime permanent. La recharge et les conditions aux limites sont considérées constantes tout au long de ces simulations.

Le fait de considérer des conditions hydrologiques (recharge et conditions aux limites) inchangées pour ces simulations constitue une hypothèse forte, et revient à s'affranchir des possibles évolutions climatiques pour l'évaluation des impacts de nouvelles exploitations de l'aquifère du Continental Terminal. Les impacts de nouvelles exploitations sur l'aquifère du Continental Terminal pourraient s'avérer plus importantes en cas de diminution de la recharge pluviométrique.

## Adaptation du maillage du modèle

Le maillage du modèle a été affiné à proximité des champs captant pour chaque scénario.

Pour les scénarios 1 à 3, le maillage a été raffiné autour des champs captant de Simon Diene et de Ndiayene, avec des tailles de mailles réduites à 100 m dans ces deux secteurs.

Pour le scénario 4, étant donnée la grande extension du secteur couvert par les trois champs captant modélisés, les mailles ont été réduites à des tailles de 200 m, afin d'éviter d'obtenir un maillage trop lourd.

Ces différences de maillages entre le scénario 4 et les 3 autres scénarios peuvent induire de petites différences de résultats pour les simulations des niveaux piézométriques. Cependant les ordres de grandeurs des niveaux piézométriques simulés ne devraient pas être affectés par ces différences.

### Calcul des rabattements simulés

Pour les 4 scénarios simulés, l'impact de la mise en œuvre des pompages sur les nouveaux forages d'exploitation a été évalué à partir des rabattements des niveaux piézométriques modélisés. Les rabattements sont définis comme la différence de piézométrie entre la situation sans les pompages et la situation avec les pompages, et sont donc positifs.

Ces rabattements sont présentés ci-après sous forme de cartes de rabattement au droit de chaque champ captant, et sous forme de rabattements calculés aux forages d'exploitation.

Les rabattements aux forages d'exploitation sont déduits des rabattements calculés par le modèle aux mailles où sont situés les forages, en utilisant une correction permettant de prendre en compte la différence de dimension entre la maille (de côté 100 ou 200 m) et le forage (diamètre de 200 mm environ).

La formule de correction utilisée est la suivante :

$$h_{\text{puits}} - h_{\text{maille}} = \frac{Q}{2T} \ln \frac{a}{r_p} - \frac{Q}{2}$$

Avec  $h_{\text{maille}}$  le niveau piézométrique simulé dans la maille,  $h_{\text{puits}}$  le niveau simulé au puits après prise en compte de la correction,  $Q$  le débit pompé,  $T$  la transmissivité de l'aquifère,  $a$  le côté de la maille, et  $r_p$  le rayon du puits.

Cette correction permet d'estimer le rabattement réel au droit du forage lié aux pertes de charges dans l'aquifère, mais ne prend pas en compte les pertes de charges quadratiques liées à l'ouvrage lui-même. Ces pertes de charges quadratiques peuvent engendrer des rabattements plus importants, notamment en cas de débits d'exploitation trop élevés.

### **Prise en compte du biseau salé**

La proximité du littoral, et la présence d'eau saumâtre en nappe autour du fleuve Saloum au nord induisent un risque de salinisation de l'aquifère du Continental Terminal en cas de surexploitation.

Des poches d'eau saumâtres sont de plus existantes au sein de l'aquifère, même si leurs localisations sont mal délimitées actuellement.

Pour ces raisons, une surveillance accrue de l'aquifère est à prévoir en cas de nouvelles exploitations. Dans le cadre de la présente étude, une évaluation simplifiée a été menée sur la provenance des eaux pompées aux nouveaux forages, et sur le risque de remontée d'eau salée lors des pompages.

L'évaluation simplifiée est faite dans un premier temps en calculant les trajectoires suivies par les molécules d'eau arrivant aux forages. Ce calcul permet d'identifier les zones d'appel des forages et de comparer celles-ci avec les zones de présence d'eaux saumâtres afin d'évaluer le risque d'attirer ces eaux par les nouveaux pompages.

Une deuxième approche a consisté à calculer les profondeurs théoriques du biseau salé au droit des forages d'exploitation, avant et après mise en œuvre des nouveaux pompages. Ces profondeurs théoriques sont comparées à la profondeur du mur de l'aquifère afin d'évaluer le risque de venue d'eau salée.

Toute cote piézométrique simulée inférieure à 1 mètre, quelle que soit la zone, est considérée ici comme faisant courir un risque important de venue d'eau salée.

Les cotes théoriques du biseau salé sont également comparées aux cotes de mur de l'aquifère, afin de vérifier si les cotes calculées indiquent un risque de présence d'eau salée au droit de chaque forage.

### 3.4.3.2. Résultats des scénarios

#### Scénario 1

La figure 30 représente les rabattements simulés autour du champ captant de Simon Diene.

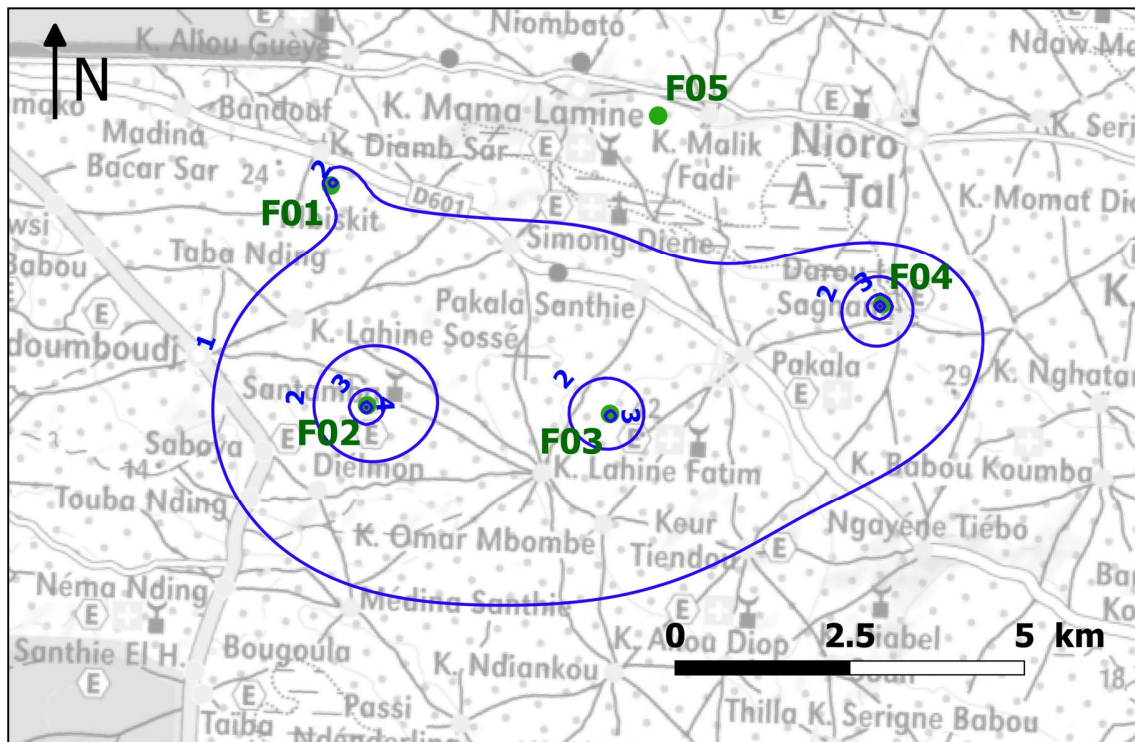


Figure 30: Rabattements piézométriques simulés pour le scénario 1

Dans le secteur du champ captant, les rabattements sont globalement compris entre 1 et 2 m, et atteignent des valeurs plus élevées à proximité des forages, jusqu'à 4 - 5 m pour F02 et F04.

Les rabattements simulés sont plus faibles à proximité de F05, situé dans une zone de perméabilité plus élevée.

Le tableau 20 suivant présente les rabattements aux forages déduits de ces résultats par la correction maille-puits.

Pour tous les forages, le niveau piézométrique du régime permanent est quasiment atteint après 20 ans de simulation. Cette durée donne un ordre de grandeur du temps de stabilisation de la nappe en cas de pompage permanent aux débits indiqués, et avec des recharges et conditions aux limites inchangées au cours du temps.

Tableau 20: Niveaux piézométriques et rabattements simulés aux forages pour le scénario 1

Forage	Niveau piézométrique simulé à la maille (m)	Niveau piézométrique simulé au forage après correction (m)	Rabattement simulé au forage (m)
F01	2,84	0,76	4,80
F02	13,68	10,88	7,94
F03	17,17	15,32	5,50
F04	8,63	4,66	9,13
F05	6,76	6,44	1,27

La figure 31 présente l'évolution temporelle des niveaux piézométriques simulés dans les mailles des forages (avant correction maille-puits), pour la simulation en régime transitoire sur 40 ans.

La figure 32 présente les trajectoires simulées aux forages d'exploitation du champ captant de Simon Diene pour le scénario 1.

Ces trajectoires mettent en évidence des écoulements qui proviennent du sud du champ captant, avec une zone d'alimentation localisée au sud des forages, et correspondant au dôme piézométrique identifié sur la carte piézométrique.

Les zones d'appel des forages ne se situent donc pas en direction du littoral situé à l'ouest du champ captant, ce qui réduit le risque d'intrusion d'eau salée provoquée par ces pompages.

Le tableau 21 récapitule les résultats de l'estimation de la position théorique du biseau salé aux forages de Simon Diene pour le scénario 1, calculée à l'aide de la formule de Ghyben-Herzberg.

Ces résultats montrent que d'après les charges simulées dans l'aquifère en prenant en compte les hypothèses de la formule de Ghyben-Herzberg, le risque de présence d'eau salée au droit des forages de Simon Diene est faible en situation avant pompage.

En situation de pompage, les résultats obtenus montrent que la cote théorique du biseau salé au droit du forage F01 est assez proche de la cote du mur de l'aquifère. Ceci indique qu'il existe un risque d'attirer le biseau salé à proximité du forage, en cas de rabattement de la nappe trop important.

Par conséquent, il est recommandé de surveiller attentivement les niveaux dynamiques atteints aux forages, particulièrement en F01, situé le plus proche du littoral, et d'installer des points de surveillance de la qualité de l'eau et des niveaux de nappe entre le champ captant de Simon Diene et le littoral.

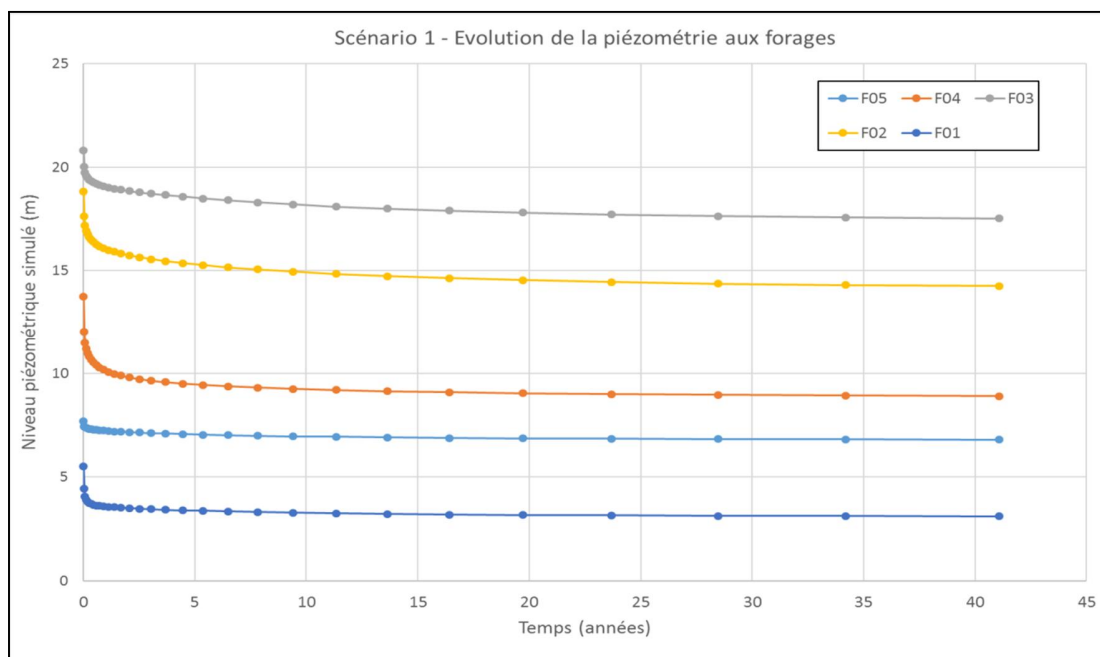


Figure 31: Evolution des niveaux piézométriques simulés aux forages pour le scénario 1

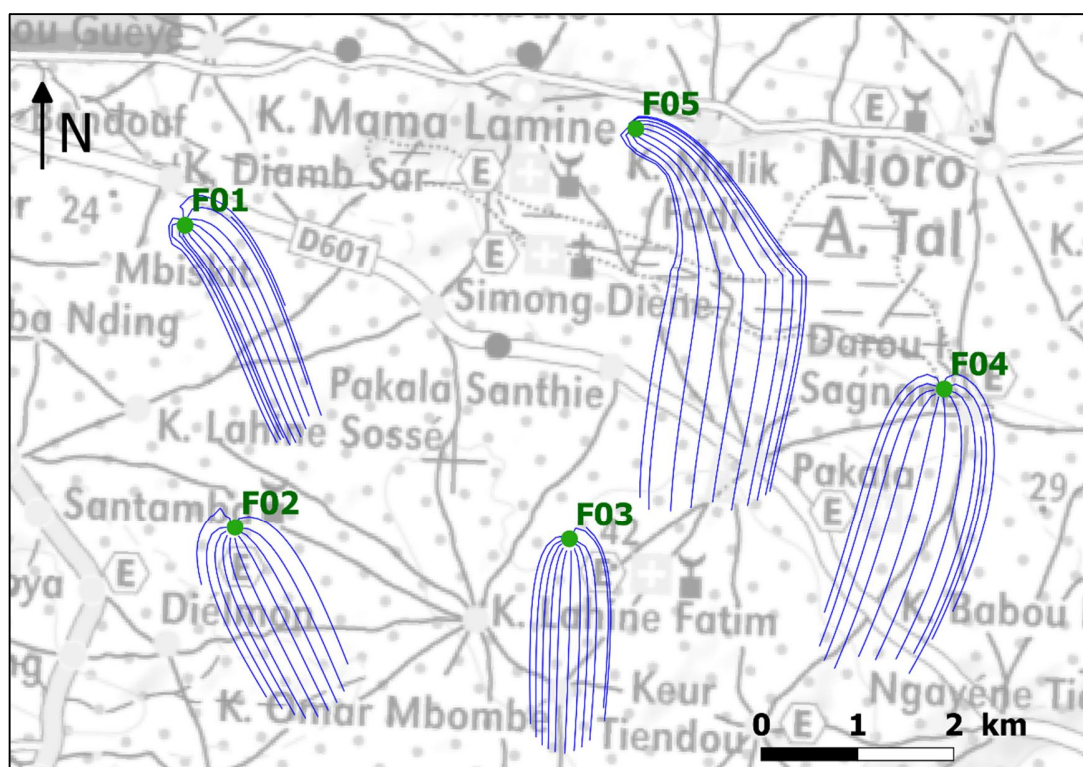


Figure 32: Trajectoires simulées en régime permanent pour le scénario 1

Tableau 21: Position théorique du biseau salé au droit des forages avant et après pompage pour le scénario 1

Forage	Cotes du biseau salé sans pompage (m)	Cotes du biseau salé avec pompage (m)	Cotes du mur de l'aquifère (m)
F01	-222,16	-30,23	-24,77
F02	-752,83	-435,16	-24,10
F03	-833,08	-612,94	-25,33
F04	-551,28	-186,25	-35,10
F05	-308,57	-257,50	-27,52



## Scénario 2

La figure 33 représente les rabattements simulés autour du champ captant de Ndiayene Moussa.

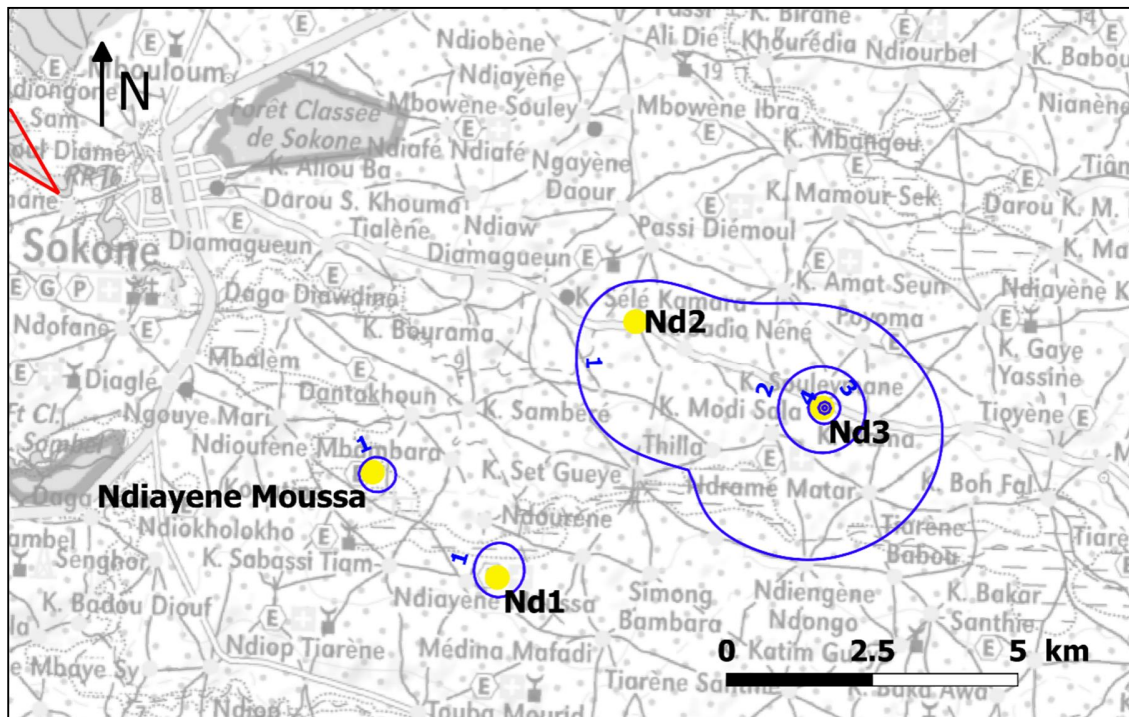


Figure 33: Rabattements piézométriques simulés pour le scénario 2

Les rabattements simulés sont inférieurs à 1 m en partie ouest du champ captant, sauf à proximité des forages où ils dépassent 1 mètre. Ils sont en revanche supérieurs à 1 m en partie est autour des forages ND2 et ND3, et atteignent plus de 4 mètres au droit du forage ND3.

Le tableau 22 présente les rabattements aux forages déduits de ces résultats par la correction maille-puits.

La figure 34 présente l'évolution temporelle des niveaux piézométriques simulés dans les mailles des forages (avant correction maille-puits), pour la simulation en régime transitoire sur 40 ans.

Tableau 22: Niveaux piézométriques et rabattements simulés aux forages pour le scénario 2

Forage	Niveau piézométrique simulé à la maille (m)	Niveau piézométrique simulé au forage après correction (m)	Rabattement simulé au forage (m)
Ndiayene Moussa	6,23	5,74	1,76
ND1	7,42	7,02	1,67
ND2	7,00	6,57	1,90
ND3	5,75	1,31	10,13

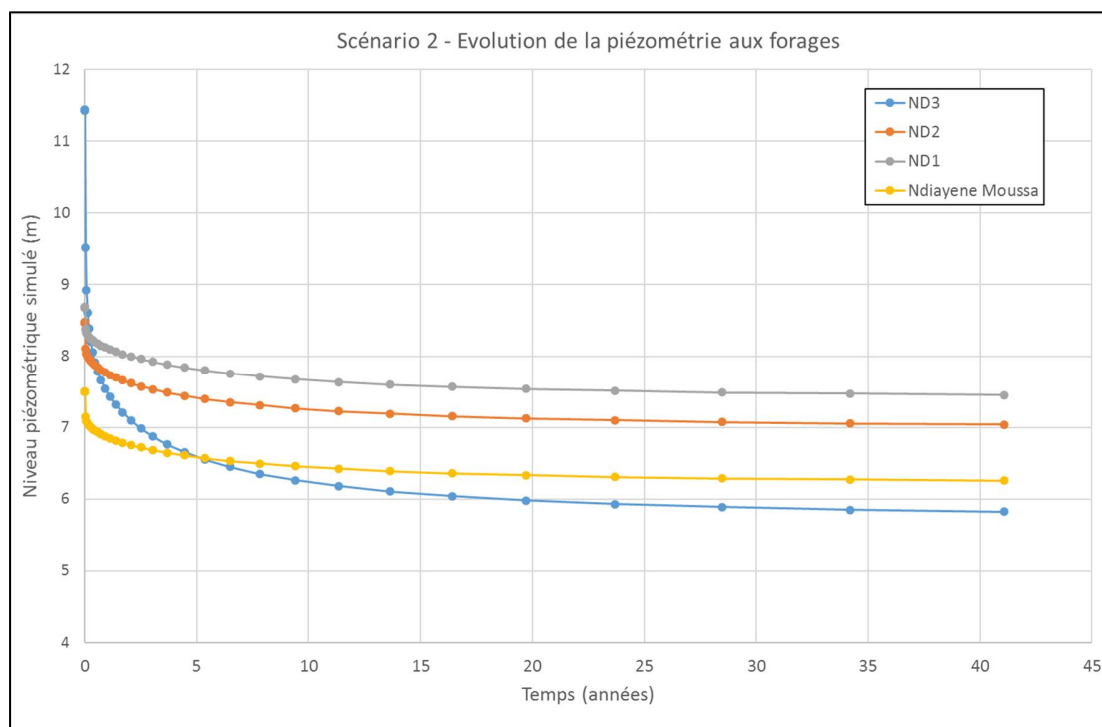


Figure 34: Evolution des niveaux piézométriques simulés aux forages pour le scénario 2

La figure 35 présente les trajectoires simulées aux forages d'exploitation du champ captant de Ndiayene Moussa pour le scénario 2.

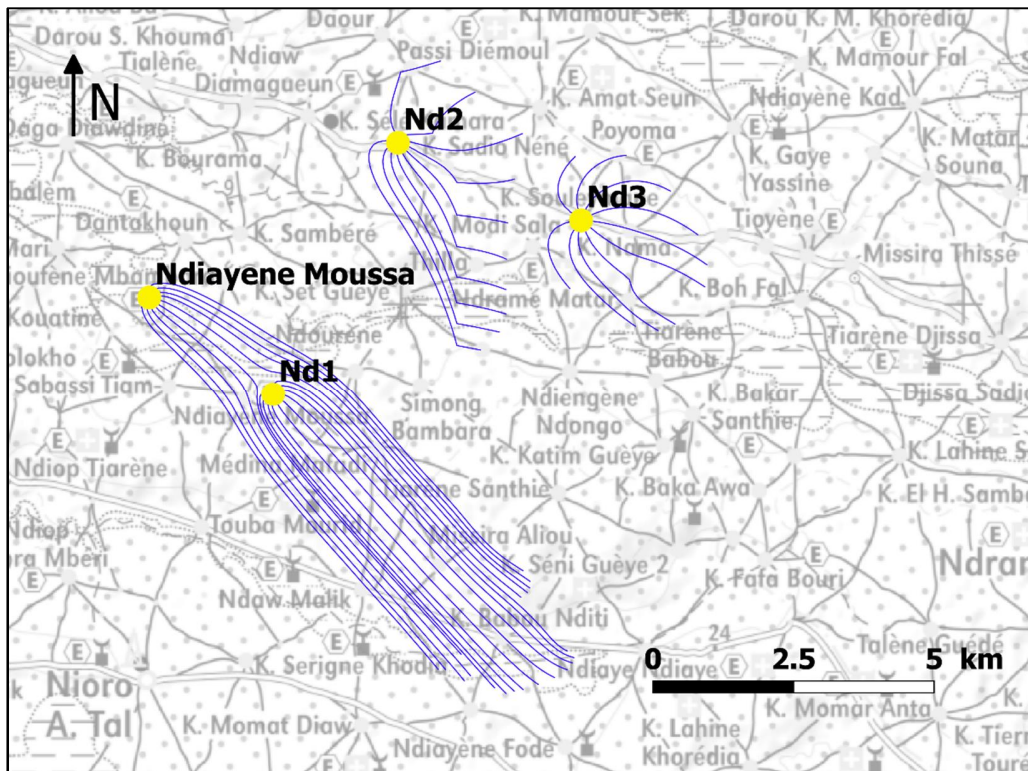


Figure 35: Trajectoires simulées en régime permanent pour le scénario 2

Les trajectoires simulées proviennent du sud-est pour les 4 forages du champ captant, en direction du dôme piézométrique identifié sur les mesures piézométriques.

Les zones d'appel des forages ne sont donc pas situées en direction du littoral localisé à l'ouest du champ captant. Le risque d'attirer des eaux salées en raison des nouveaux pompages est donc assez limité.

Le tableau 23 récapitule les résultats de l'estimation de la position théorique du biseau salé aux forages de Ndiayene Moussa pour le scénario 2, calculée à l'aide de la formule de Ghyben-Herzberg.

Tableau 23: Position théorique du biseau salé au droit des forages avant et après pompage pour le scénario 2

Forage	Cotes du biseau salé sans pompage (m)	Cotes du biseau salé avec pompage (m)	Cotes du mur de l'aquifère (m)
Ndiayene Moussa	-300,22	-229,68	-30,96
ND1	-347,48	-280,72	-36,52
ND2	-339,05	-262,87	-31,09
ND3	-457,48	-52,26	-35,72

Ces résultats montrent que d'après les charges simulées dans l'aquifère en prenant en compte les hypothèses de la formule de Ghyben-Herzberg, le risque de présence d'eau salée au droit des forages de Ndiayene Moussa est faible en situation avant pompage.

En situation de pompage, les résultats obtenus montrent que la cote théorique du biseau salé au droit du forage Nd3 est assez proche de la cote du mur de l'aquifère. Ceci indique qu'il existe un risque d'attirer le biseau salé à proximité du forage, en cas de rabattement de la nappe trop important. Cependant dans le cas de ce forage, ce risque est à moduler du fait de son éloignement relatif au littoral.

Ce résultat doit conduire à une surveillance renforcée des niveaux piézométriques au droit du champ captant, ainsi qu'à une surveillance de la qualité des eaux et des niveaux piézométriques entre le champ captant et le littoral, afin d'identifier à temps toute venue d'eau salée dans cette zone.

### Scénario 3

La figure 36 représente les rabattements simulés autour des champs captant de Simon Diene et de Ndiayene Moussa pour le scénario 3. Autour des deux champs captant de Simon Diene et de Ndiayene Moussa, les rabattements sont supérieurs à 1 mètre. Ils atteignent plusieurs mètres à proximité des forages F02, F03, F04 et Nd3, situés dans des zones à faible perméabilité.

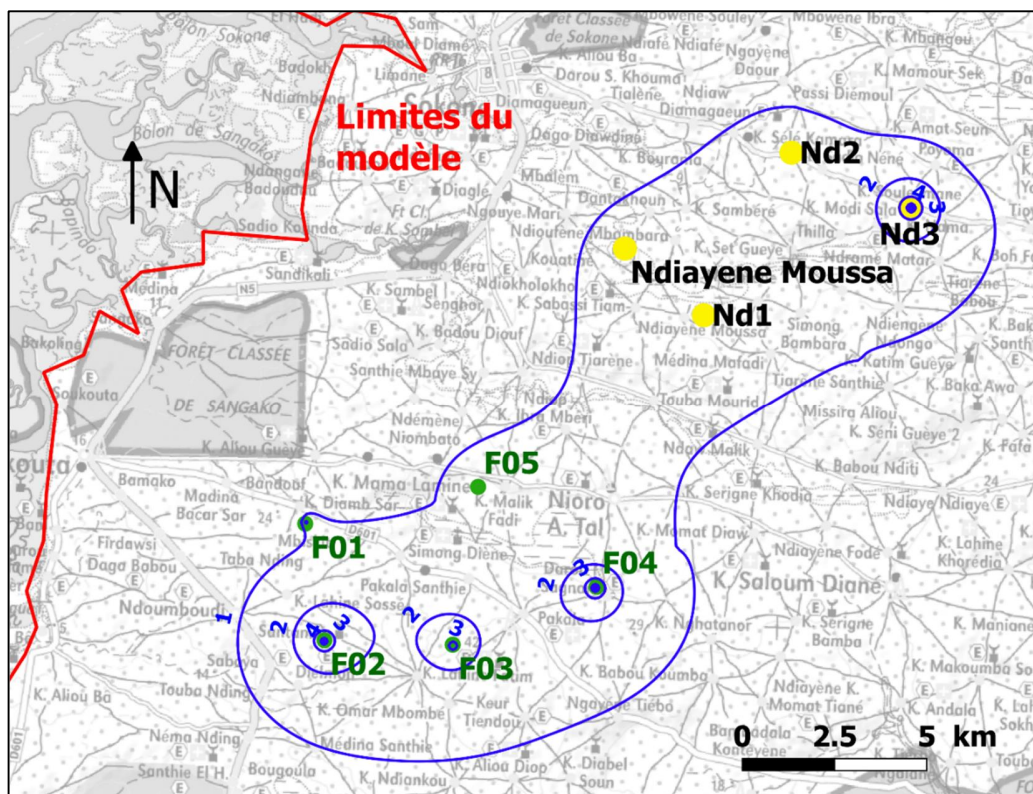


Figure 36: Rabattements piézométriques simulés pour le scénario 3

Le tableau 24 présente les rabattements aux forages déduits de ces résultats par la correction maille-puits.

Tableau 24: Niveaux piézométriques et rabattements simulés aux forages pour le scénario 3

Champ captant	Forage	Niveau piézométrique simulé à la maille (m)	Niveau piézométrique simulé au forage après correction (m)	Rabattement simulé au forage (m)
Simon Diene	F01	3,20	2,16	3,53
	F02	13,54	10,72	8,08
	F03	16,93	15,07	5,72
	F04	8,11	4,13	9,55
	F05	6,23	5,91	1,81
Ndiayene Moussa	Ndiayene Moussa	5,80	5,31	2,00
	Nd1	6,98	6,57	1,94
	Nd2	6,65	6,22	2,10
	Nd3	5,48	1,03	10,28

La figure 37 présente l'évolution temporelle des niveaux piézométriques simulés dans les mailles des forages (avant correction maille-puits), pour la simulation en régime transitoire sur 40 ans.



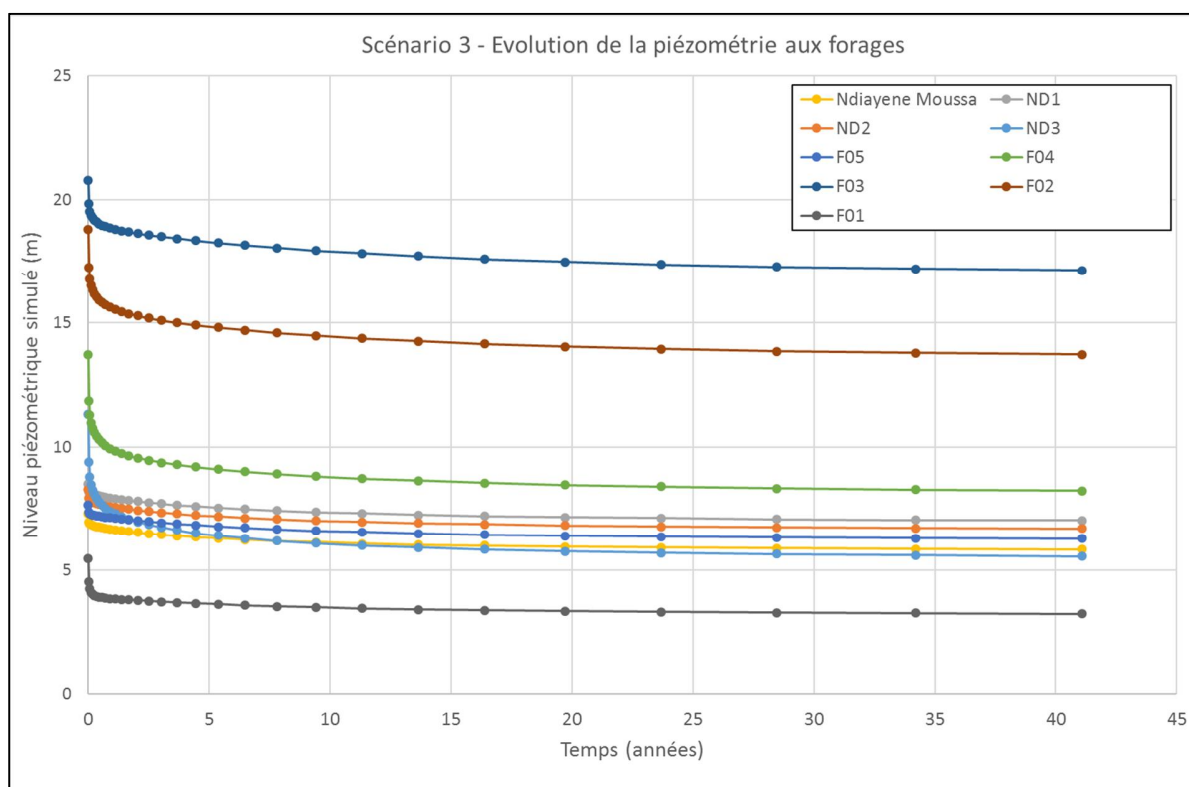


Figure 37: Evolution des niveaux piézométriques simulés aux forages pour le scénario 3

Le niveau piézométrique du régime permanent est quasiment atteint après 25 ans de simulation pour l'ensemble des forages des champs captant de Ndiayene Moussa et de Simon Diene, dans les conditions inchangées prises en compte dans le modèle.

La figure 38 présente les trajectoires simulées aux forages d'exploitation des champs captant de Simon Diene et de Ndiayene Moussa pour le scénario 3.



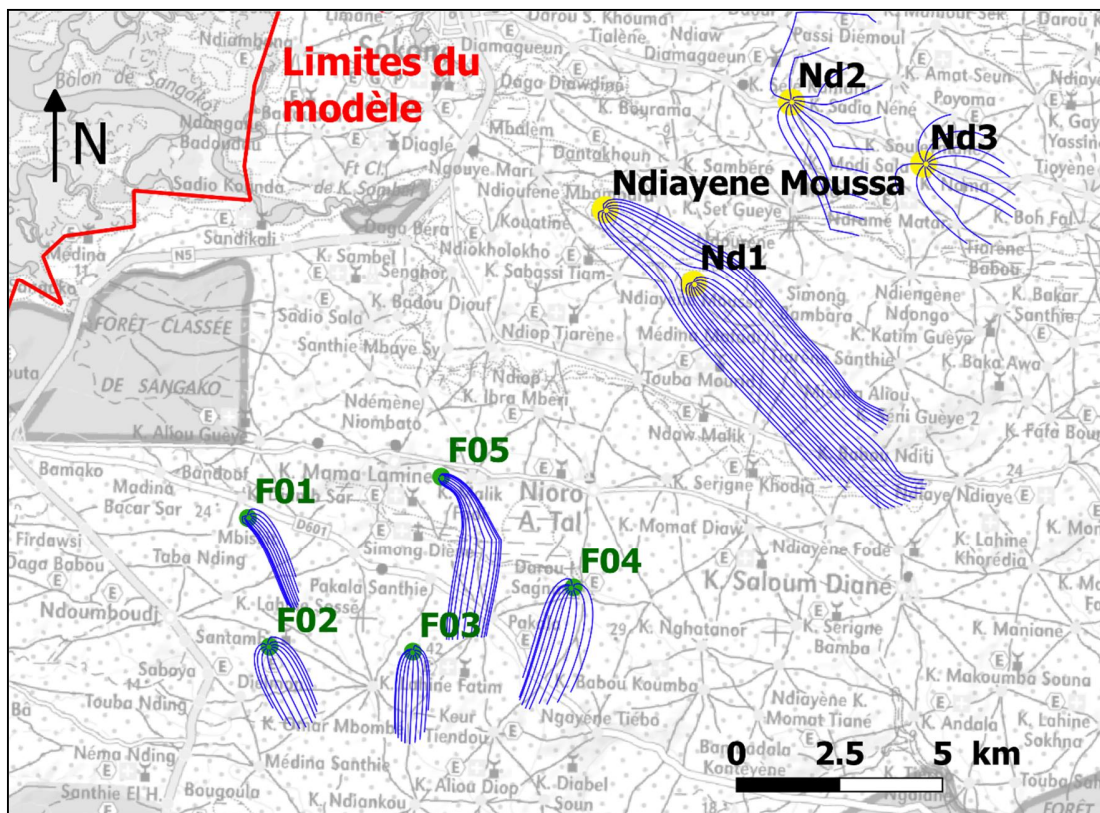


Figure 38: Trajectoires simulées en régime permanent pour le scénario 3

Les trajectoires simulées pour le scénario 3 sont très proches de celles obtenues pour les scénarios 1 et 2, et montrent que les zones d'appel des forages d'exploitation se situent vers le sud pour le champ captant de Simon Diene, et vers le sud-est pour le champ captant de Ndiayene Moussa.

Ces zones d'appel ne sont pas situées en direction du littoral, ce qui réduit le risque d'attirer des eaux salées vers les forages.

Le tableau 25 récapitule les résultats de l'estimation de la position théorique du biseau salé aux forages de Simon Diene et de Ndiayene Moussa pour le scénario 3.

Tableau 25 : Position théorique du biseau salé au droit des forages avant et après pompage pour le scénario 3

Forage	Cotes du biseau salé sans pompage (m)	Cotes du biseau salé avec pompage (m)	Cotes du mur de l'aquifère (m)
F01	-227,69	-86,30	-24,77
F02	-751,79	-428,62	-24,10
F03	-831,62	-602,72	-25,33
F04	-547,49	-165,38	-35,10
F05	-308,45	-236,24	-27,52
Ndiayene Moussa	-292,38	-212,45	-30,96
ND1	-340,39	-262,93	-36,52
ND2	-332,57	-248,71	-31,09
ND3	-452,55	-41,20	-35,72

Ces résultats font apparaître un risque réduit au niveau du forage F01 par rapport au scénario 1, en raison d'un débit d'exploitation plus faible que dans ce scénario. Cependant ce forage étant proche du littoral, une surveillance accrue reste nécessaire même avec un débit d'exploitation moyen limité. En effet des débits ponctuellement plus élevés et des variations de conditions de recharge peuvent conduire à une surexploitation temporaire et à une intrusion d'eau salée.

Le risque d'intrusion saline est au contraire accru au forage ND3, au niveau duquel le débit d'exploitation n'a pas été modifié par rapport au scénario 2. Au droit de ce forage, la présence simultanée de pompes aux deux champs captant induit une remontée du biseau salé théorique à proximité du mur de l'aquifère. Ceci doit conduire à une limitation des débits pompés en ce point,

en cas de confirmation des propriétés hydrodynamiques de l'aquifère modélisé, et à une surveillance des niveaux dynamiques et de la qualité des eaux à proximité du champ captant.

Les deux champs captant simulés dans le scénario 3 étant proches du littoral, une surveillance de l'aquifère entre les champs captant et la bordure océanique est à prévoir.

#### Scénario 4

La figure 39 représente les rabattements simulés autour des champs captant de Simon Diene, de Ndiayene Moussa et de Keur Madiabel pour le scénario 4.

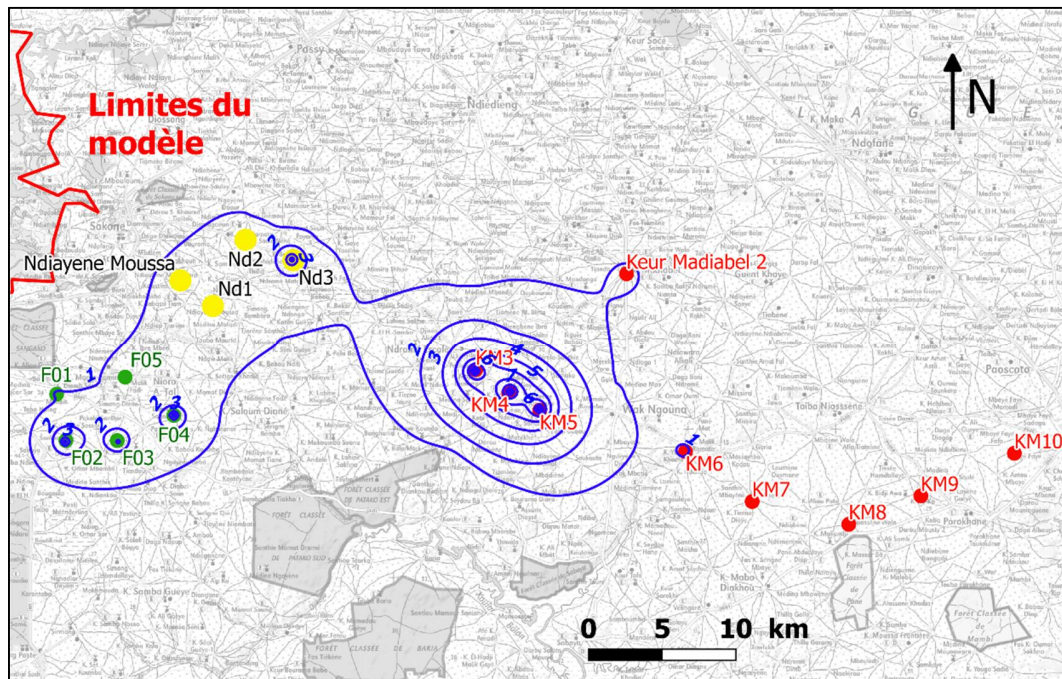


Figure 39: Rabattements piézométriques simulés pour le scénario 4

Les rabattements simulés sont supérieurs à 1 mètre autour des champs captant de Simon Diene et de Ndiayene Moussa, en partie ouest du modèle, et autour des 4 forages les plus à l'ouest du champ captant de Keur Madiabel. Ils sont inférieurs à 1 mètre autour des 5 forages les plus à l'est du champ captant de Keur Madiabel, les forages KM6 à KM10.

Ces rabattements atteignent des valeurs de plus de 6 mètres autour des forages KM3, KM4 et KM5, situés dans une zone de plus faible perméabilité.

Le tableau 26 présente les rabattements aux forages déduits de ces résultats par la correction maille-puits.

Les rabattements simulés aux forages de Simon Diene et aux forages de Ndiayene sont proches de ceux simulés pour le scénario 3. Les différences avec ce scénario sont principalement dues aux différences de maillages qui induisent des rabattements un peu plus faibles dans le scénario 4.

Les rabattements simulés aux forages de Keur Madiabel, pour lesquels les débits d'exploitation simulés sont de 70 m<sup>3</sup>/h partout, se répartissent en trois classes :

- Aux forages KM3, KM4 et KM5, les rabattements sont de l'ordre de 15 m environ. Ces trois forages se trouvent dans une zone de faible perméabilité et sur un dôme piézométrique.
- Aux forages de Keur Madiabel 2 et KM6, les rabattements sont compris entre 2 et 2,5 m. Ces forages sont situés dans une zone de perméabilité intermédiaire.
- Aux forages KM7, KM8, KM9 et KM10, les rabattements simulés sont très faibles, inférieurs au mètre, en raison de la forte perméabilité et de la puissance de l'aquifère du Continental Terminal dans cette zone.

Les deux figures 40 et 41 présentent l'évolution temporelle des niveaux piézométriques simulés dans les mailles des forages (avant correction maille-puits), pour la simulation en régime transitoire sur 40 ans.

Tableau 26: Niveaux piézométriques et rabattements simulés aux forages pour le scénario 4

Champ captant	Forage	Niveau piézométrique simulé à la maille (m)	Niveau piézométrique simulé au forage après correction (m)	Rabattement simulé au forage (m)
Simon Diene	F01	4,53	2,76	3,48
	F02	14,67	11,51	7,79
	F03	17,74	15,65	5,59
	F04	8,99	4,50	9,41
	F05	6,79	6,43	1,80
Ndiayene Moussa	Ndiayene Moussa	6,26	5,71	2,09
	Nd1	7,38	6,92	2,03
	Nd2	7,01	6,52	2,17
	Nd3	6,18	1,16	10,45
Keur Madiabel	Keur Madiabel 2	6,80	5,89	2,53
	KM3	6,20	-0,77	17,20
	KM4	8,08	1,20	15,32
	KM5	8,74	2,36	13,84
	KM6	7,00	6,08	2,27
	KM7	6,61	6,56	0,46
	KM8	6,35	6,30	0,44
	KM9	6,25	6,20	0,39
	KM10	6,03	5,98	0,39

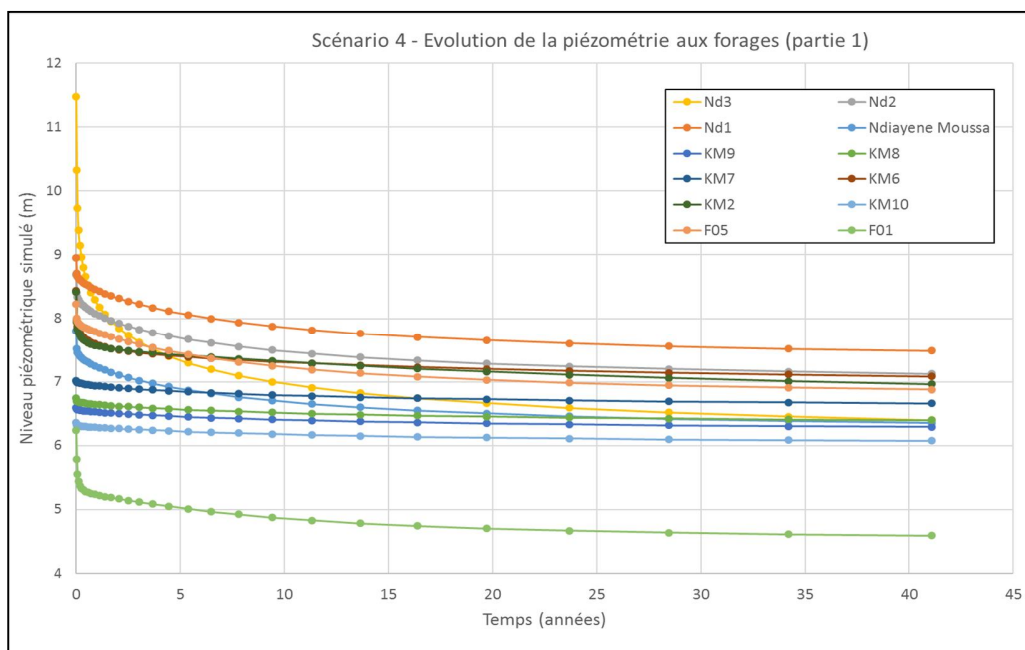


Figure 40: Evolution des niveaux piézométriques simulés aux forages pour le scénario 4 (partie 1)

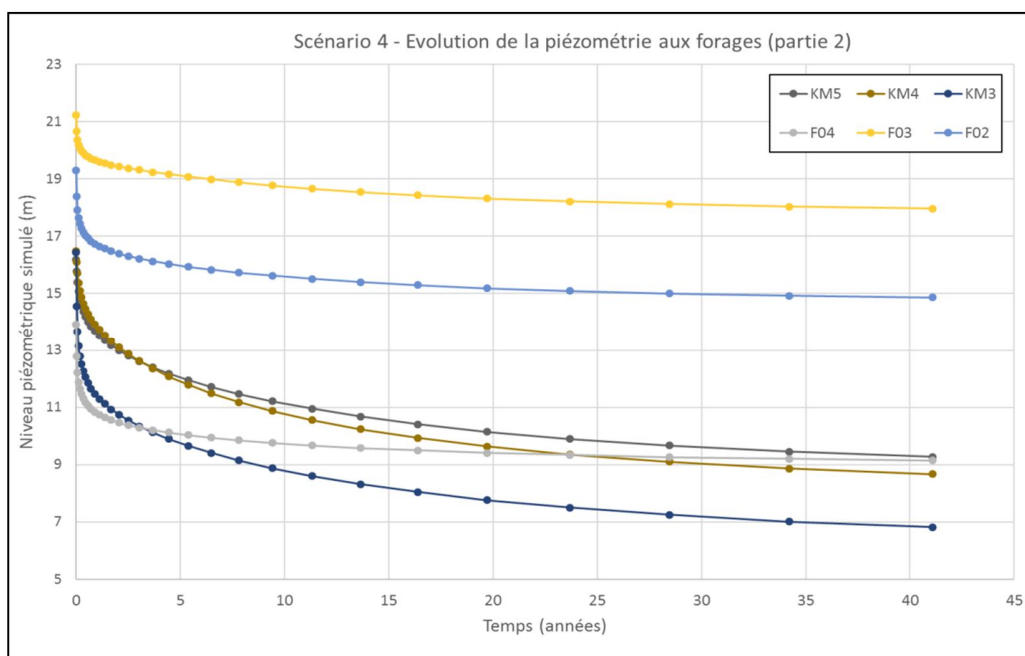


Figure 41: Evolution des niveaux piézométriques simulés aux forages pour le scénario 4 (partie 2)



Les niveaux piézométriques du régime permanent sont quasiment atteints pour tous les forages après 40 ans de simulation. L'atteinte du régime permanent est globalement plus longue pour les forages de Keur Madiabel que pour les deux autres champs captant, en raison de leur plus grand éloignement aux limites de réalimentation du modèle.

La figure 42 présente les trajectoires simulées aux forages d'exploitation des champs captant de Simon Diene, de Ndiayene Moussa et de Keur Madiabel pour le scénario 4.

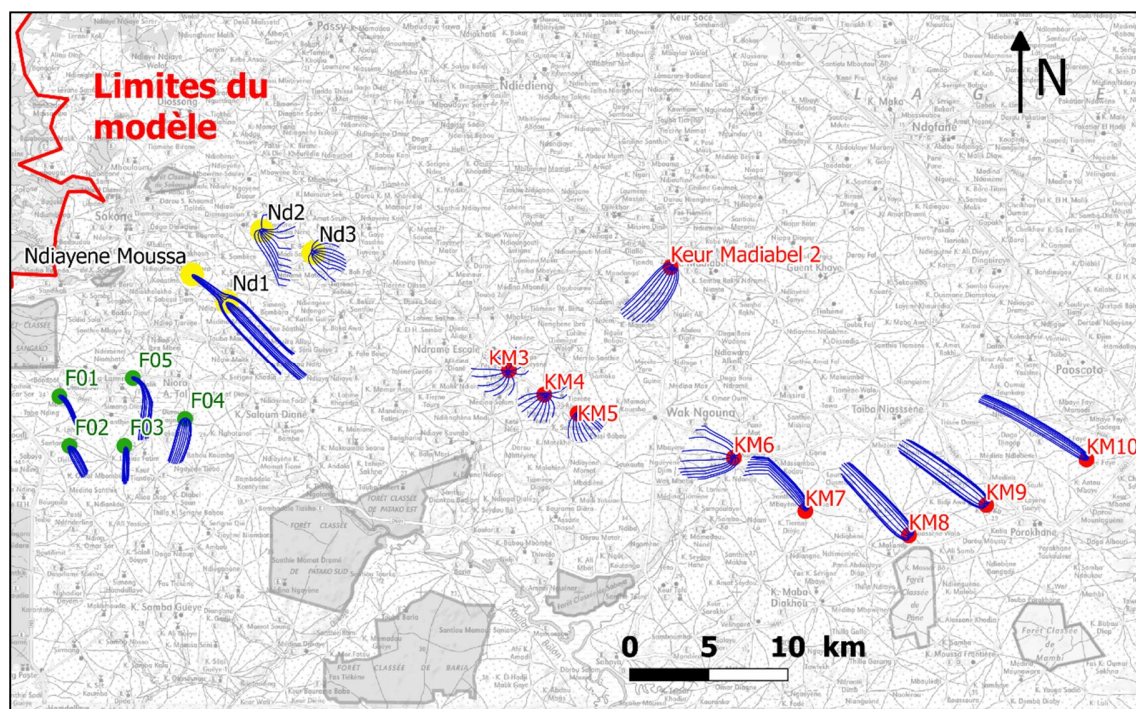


Figure 42: Trajectoires simulées en régime permanent pour le scénario 4

Les trajectoires simulées aux forages des champs captant de Simon Diene et de Ndiayene Moussa sont semblables à celles obtenues pour les scénarios précédents, et ne font pas apparaître de venues d'eau en direction du littoral situé à l'ouest.



Les zones d'appel des forages de Keur Madiabel se situent au sud pour les trois forages les plus à l'ouest (KM3, KM4 et KM5) dans le secteur du dôme piézométrique et pour le forage de Keur Madiabel 2. Pour les quatre forages en partie est (KM6, KM7, KM8 et KM9), les zones d'appel sont localisées en direction est à nord-est. Ces forages sont suffisamment éloignés du littoral à l'ouest et du fleuve Saloum au nord pour que le risque d'intrusion d'eau saline soit très limité. Cependant des poches d'eaux saumâtres peuvent exister localement dans l'aquifère du Continental Terminal, et une surveillance de la qualité des eaux et des niveaux dynamiques à proximité des forages est donc indispensable afin de prévenir tout risque de dégradation de la qualité des eaux pompées.

Ceci est particulièrement vrai pour le forage de Keur Madiabel 2, à proximité duquel des teneurs en chlorures élevées ont été mesurées en 2016.

Comme pour les scénarios précédents, un suivi de la qualité de l'eau et des niveaux piézométriques est également recommandé à proximité du littoral et des champs captant de Simon Diene et de Ndiayene Moussa.

Le tableau 27 récapitule les résultats de l'estimation de la position théorique du biseau salé aux forages de Simon Diene, de Ndiayene Moussa et de Keur Madiabel pour le scénario 4.

La position théorique du biseau salé au droit des forages est proche du mur de l'aquifère pour les forages ND3 et KM4 dans ce scénario. Elle devient même supérieure à la cote du mur de l'aquifère pour le forage KM3, ce qui présente un risque fort d'intrusion d'eau salée en cas de présence d'une poche d'eau salée à proximité.

Ce forage étant situé loin du littoral, il est peu à risque d'attirer de l'eau de mer dans l'aquifère, cependant il est à risque d'attirer l'eau salée présente de manière localisée dans l'aquifère. Les débits doivent donc être limités à ce point, et la surveillance de la qualité de l'eau à proximité renforcée.

Les mêmes recommandations de suivi et de surveillance que pour les scénarios précédents sont également applicables pour le scénario 4.

Tableau 27: Position théorique du biseau salé au droit des forages avant et après pompage pour le scénario 4

Forage	Cotes du biseau salé sans pompage (m)	Cotes du biseau salé avec pompage (m)	Cotes du mur de l'aquifère (m)
F01	-249,65	-110,57	-24,77
F02	-771,70	-460,20	-24,10
F03	-849,45	-626,03	-25,33
F04	-556,44	-179,88	-35,10
F05	-328,92	-257,03	-27,52
Ndiayene Moussa	-311,92	-228,35	-30,96
ND1	-358,22	-276,93	-36,52
ND2	-347,77	-260,83	-31,09
ND3	-464,50	-46,54	-35,72
Keur Madiabel 2	-336,71	-235,61	-45,34
KM3	-657,37	30,80	-38,73
KM4	-660,49	-47,82	-39,53
KM5	-648,06	-94,28	-41,33
KM6	-334,20	-243,28	-45,83
KM7	-280,94	-262,47	-43,72
KM8	-269,77	-252,08	-41,05
KM9	-263,77	-248,03	-44,98
KM10	-254,53	-239,01	-49,11

### Scénario 5

La figure 43 représente les rabattements simulés autour des champs captant de Simon Diene, de Ndiayene Moussa et de Keur Madiabel pour le scénario 5.

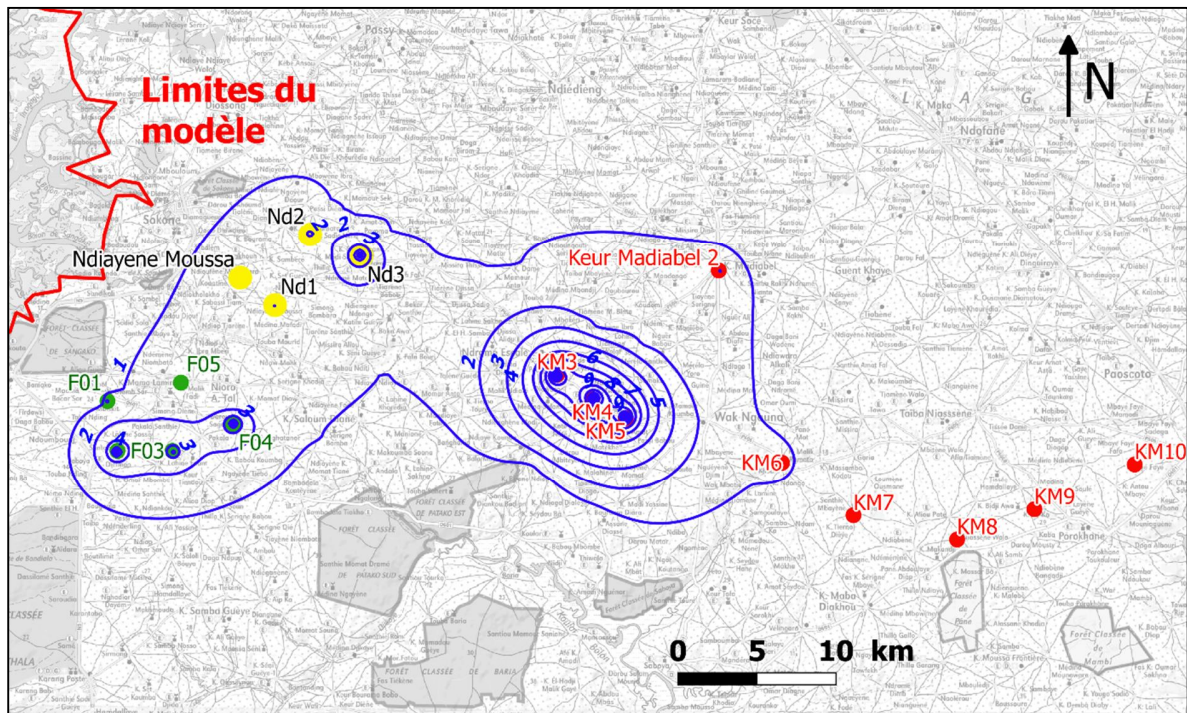


Figure 43: Rabattements piézométriques simulés pour le scénario 5

Par rapport au scénario 4, la zone de rabattement supérieure à 1 mètre est beaucoup plus étendue pour le scénario 5. De plus les rabattements maximums simulés à proximité des forages sont plus élevés, et atteignent plus de 15 m aux forages les plus à l'ouest de Keur Madiabel.

L'impact des nouveaux pompages sur la nappe du Continental Terminal est donc bien plus important avec le scénario 5 qu'avec le scénario 4. Cependant, à l'exception des forages KM3, KM4 et KM5, les rabattements restent faibles devant l'épaisseur mouillée de l'aquifère du Continental Terminal, supérieure à 30 m.

Ces résultats sont valables dans les conditions de recharge actuelles et des rabattements plus importants sont possibles en cas de baisse durable de la recharge.

Le tableau 28 présente les rabattements aux forages déduits de ces résultats par la correction maille-puits.

Dans ce scénario, les niveaux piézométriques simulés sont problématiques au droit des ouvrages Nd3, KM3, KM4 et KM5, en raison des débits simulés et des faibles perméabilités dans ces secteurs. En effet les niveaux théoriques au droit de ces forages atteignent des valeurs inférieures à 0 m, ce qui fait craindre l'arrivée d'eau salée en cas de présence de poches d'eau salée dans l'aquifère à proximité, ou sous l'eau douce moins dense.

Les rabattements restent très limités aux forages en partie est du champ captant de Keur Madiabel, cependant les propriétés de l'aquifère dans cette zone restent à confirmer avec des forages et pompages d'essai.

Les niveaux piézométriques simulés sont également en limite des valeurs acceptables pour le forage F04 de Simon Diene.

Les deux figures 44 et 45 présentent l'évolution temporelle des niveaux piézométriques simulés dans les mailles des forages (avant correction maille-puits), pour la simulation en régime transitoire sur 40 ans.

Tableau 28: Niveaux piézométriques et rabattements simulés aux forages pour le scénario 5

Champ captant	Forage	Niveau piézométrique simulé à la maille (m)	Niveau piézométrique simulé au forage après	Rabattement simulé au forage (m)
Simon Diene	F01	3,97	1,62	4,63
	F02	13,05	8,83	10,46
	F03	16,77	14,16	7,08
	F04	7,65	2,03	11,88
	F05	6,42	5,99	2,23
Ndiayene Moussa	Ndiayene Moussa	5,82	5,11	2,68
	Nd1	6,93	6,35	2,61
	Nd2	6,52	5,90	2,79
	Nd3	4,72	-1,55	13,16
Keur Madiabel	Keur Madiabel 2	6,32	5,15	3,26
	KM3	2,75	-6,21	22,64
	KM4	5,32	-3,54	20,05
	KM5	6,32	-1,89	18,09
	KM6	6,58	5,40	2,96
	KM7	6,49	6,43	0,60
	KM8	6,23	6,17	0,57
	KM9	6,14	6,09	0,51
	KM10	5,93	5,86	0,50

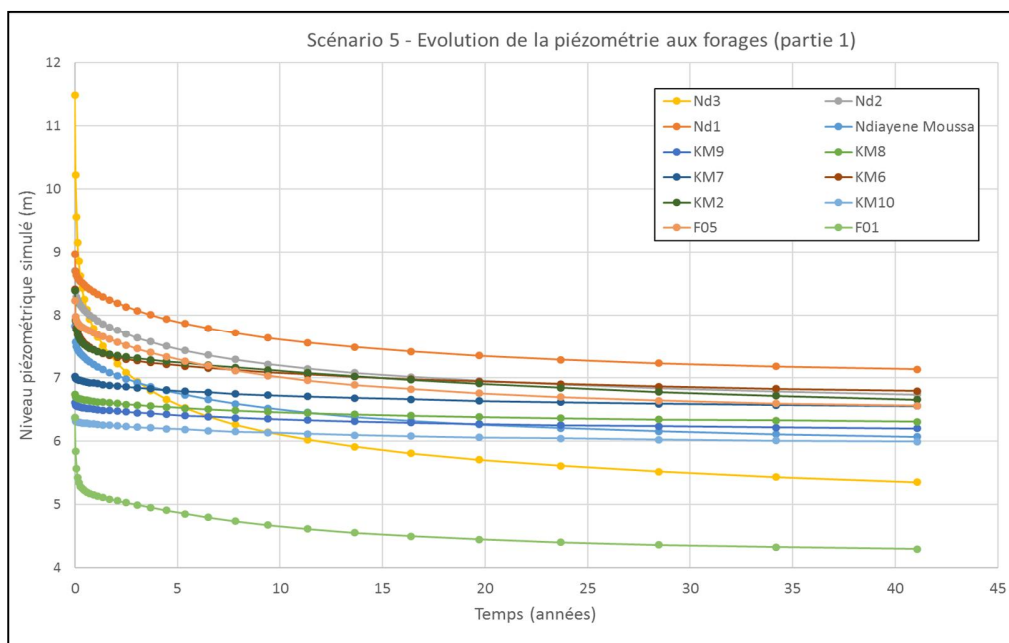


Figure 44: Evolution des niveaux piézométriques simulés aux forages pour le scénario 5 (partie 1)

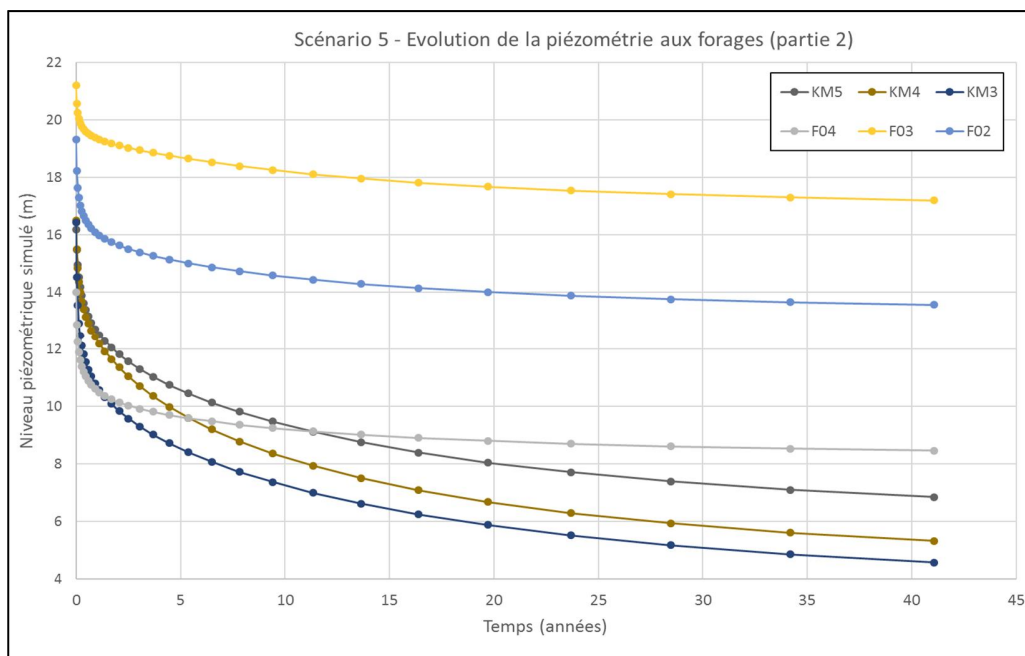


Figure 45: Evolution des niveaux piézométriques simulés aux forages pour le scénario 5 (partie 2)

Les niveaux piézométriques simulés mettent plus de temps à se stabiliser aux niveaux d'équilibre de la simulation en régime permanent que pour le scénario 4, en raison des débits plus élevés.

La figure 46 présente les trajectoires simulées aux forages d'exploitation des champs captant de Simon Diene, de Ndiayene Moussa et de Keur Madiabel pour le scénario 5.

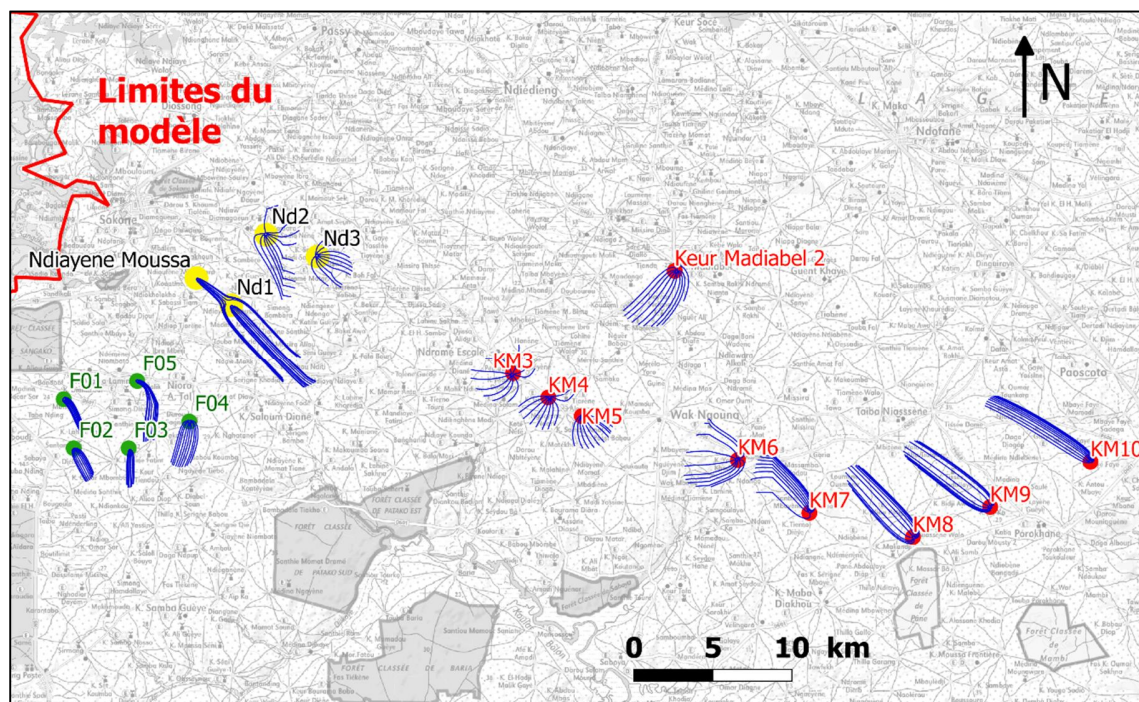


Figure 46: Trajectoires simulées en régime permanent pour le scénario 5

Les trajectoires simulées aux forages sont presque identiques à celles du scénario 4, avec des zones d'appel un peu plus larges en raison des débits de pompage plus élevés de ce scénario.

Les risques d'intrusion d'eau salée sont donc limités pour les trois champs captant, mais la proximité du littoral de Simon Diene et de Ndiayene Moussa, et la présence possible de poches d'eaux saumâtres dans le secteur de Keur Madiabel, doivent conduire à une surveillance des niveaux piézométriques et



des paramètres physico-chimiques aux forages de pompage, et à des piézomètres de surveillance positionnés dans les zones d'appel des forages et en direction des zones à eaux saumâtres ou salées.

Cette surveillance est d'autant plus primordiale que les débits simulés ici sont élevés, induisant un risque plus grand de surexploitation temporaire ou durable.

Le tableau suivant récapitule les résultats de l'estimation de la position théorique du biseau salé aux forages de Simon Diene, de Ndiayene Moussa et de Keur Madiabel pour le scénario 5.

La position théorique du biseau salé au droit des forages est problématique pour ND3, KM3, KM4 et KM5, ce qui indique un risque marqué d'attirer des eaux salées avec les rabattements simulés.

Les recommandations de suivi et surveillance des eaux souterraines faites pour les scénarios 1 à 4 sont valables également pour le scénario 5, qui présente un risque accru de surexploitation et de dégradation de la qualité des eaux.



Tableau 29: Position théorique du biseau salé au droit des forages avant et après pompage pour le scénario 4

Forage	Cotes du biseau salé sans pompage (m)	Cotes du biseau salé avec pompage (m)	Cotes du mur de l'aquifère (m)
F01	-249,65	-64,62	-24,77
F02	-771,70	-353,18	-24,10
F03	-849,45	-566,28	-25,33
F04	-556,44	-81,32	-35,10
F05	-328,92	-239,55	-27,52
Ndiayene Moussa	-311,92	-204,56	-30,96
ND1	-358,22	-253,87	-36,52
ND2	-347,77	-235,97	-31,09
ND3	-464,50	62,09	-35,72
Keur Madiabel 2	-336,71	-206,13	-45,34
KM3	-657,37	248,26	-38,73
KM4	-660,49	141,59	-39,53
KM5	-648,06	75,41	-41,33
KM6	-334,20	-215,89	-45,83
KM7	-280,94	-257,12	-43,72
KM8	-269,77	-246,88	-41,05
KM9	-263,77	-243,40	-44,98
KM10	-254,53	-234,46	-49,11

#### **3.4.4. Potentiel exploitable**

Le potentiel exploitable est approché dans ce chapitre en considérant les bilans d'eau issus des différents scénarios développés dans le chapitre précédent et un scénario additionnel où les débits pompés sont augmentés dans le champ captant de Keur Madiabel. Pour cela, 7 nouveaux forages ont été testés en plus de ceux du scénario 5. Ils ont été implantés sur l'axe de l'alignement des forages de Keur Madiabel et leurs positions se trouvent entre les forages KM. Les débits utilisés sont les mêmes que ceux appliqués pour le scénario 5. Le tableau de calcul bilantaire établi pour la phase de calage et les 6 scénarios permet d'apprécier l'évolution du système et plus particulièrement les termes du bilan par référence aux conditions aux limites et aux échanges avec l'extérieur. Ici, nous nous focalisons essentiellement sur les termes du bilan aux limites du système représentés par la limite océanique, la limite du fleuve Saloum et celle du fleuve Gambie. Les deux premières limites sont celles où sont suspectées les entrées d'eau salée contrairement à la limite du fleuve Gambie où les simulations n'ont montré aucune entrée d'eau. Il ressort globalement que les sorties vers les limites du système sont de très loin supérieures (de 5 ordre de grandeur) aux entrées qui varient peu (6772 à 7393 m<sup>3</sup>/j) pour des prélèvements variant entre 20643 et 67562 m<sup>3</sup>/j. Ces entrées sont principalement représentées par les flux en provenance de la limite Ouest et de la partie amont du fleuve Saloum où le plan d'eau libre est plus élevé que les charges hydrauliques de la nappe à proximité. Elles sont relativement faibles par référence aux dimensions de ces limites. La recharge constitue la principale entrée du système et les décharges se font au niveau des limites, mais également par évaporation et par drainage des cours d'eau Nema, Djokoye, Baobalon. Les prélèvements représentent dans le bilan global au maximum 8 % pour le scénario 6. Ceci atteste que le potentiel exploitable pour ce système est de très loin d'être atteint et l'effet des prélèvements sur les flux d'entrée est relativement faible. De plus le bilan global représentant la

différence des flux d'entrée et des flux de sortie est très faible avec un maximum de -26 m/j (pour le scénario 6) pour une période de 40 ans. Ce qui indique que les réserves de la nappe sont encore peu sollicitées.

Tableau 30: Bilan d'eau des phases de calage et de simulation

	Entree		Sortie					
	recharge	limite	Decharge	limite	Limite Ouest	exploitation	Evaporation	Drains
2016	829245	6772	32958	275824	140405	20643	159439	206747
Sc1	829245	6828	32958	273396	142957	24482	157130	205163
Sc2	829245	6800	32958	274596	139424	26642	157263	205173
Sc3	829245	6850	32958	273130	139718	30362	157907	204047
Sc4	829245	7212	32958	271250	136491	45482	154177	198139
Sc5	829245	7269	32958	269901	132802	52442	152943	195486
Sc6	829245	7393	32958	265403	132632	67562	151076	187033

## 4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Au terme des investigations menées dans le cadre de ce projet, il ressort les principales conclusions suivantes :

- Sur le plan climatique et hydrologique, la région connaît depuis les années 1998 un retour timide de régime pluviométrique normal avec une variabilité très importante d'une année à l'autre. Les quantités de pluie tombées sont en moyenne entre 618 et 880 mm/an pour la période 1960-2014 correspondant à un potentiel de volume de l'ordre de 6.5 milliards de  $m^3$  par an. Ce potentiel alimente aussi bien le ruissellement de surface que la nappe superficielle par recharge directe. En ce qui concerne les écoulements de surface, parmi les 12 bassins versants identifiés, seuls 3 présentent un écoulement permanent ; il s'agit de Madina Djokoye, Nema et Baobolon où les débits moyens en dehors des périodes de crues sont relativement faibles ( $0.016$  à  $0.35 m^3/s$ ) correspondant à des volumes entre 2 et 10 millions de  $m^3$ . Une grande partie de cet écoulement est assuré par la restitution de la nappe superficielle qui soutient leur régime ; celle-ci atteint 37% au niveau de Madina Djikoye.
- Sur le plan hydrogéologique, l'aquifère du CT de puissances variables (30-120 m) selon les zones présente également des caractéristiques variables avec des valeurs de transmissivité de  $10^{-3}$  à  $10^{-4} m^2/s$  avec une moyenne de  $2,5.10^{-3} m^2/s$  et des débits spécifiques de 1 à  $37 m^3/h/m$  capable de fournir d'excellents débits à plus de  $150 m^3/h$ . L'écoulement de la nappe se fait grossièrement à partir de la zone de dôme piézométrique (+24 m) vers toutes les directions suivant un gradient hydraulique variable (dépendant de la transmissivité). Vers le Nord, une dépression piézométrique à -4m en moyenne qui s'étend selon une direction W-E d'altitude collecte l'écoulement de la nappe. Du fait de

son caractère superficiel, la nappe bénéficie d'une recharge saisonnière induite par l'infiltration des eaux de pluie comme l'atteste les remontées de l'ordre de 0,03 à +4,4m (moyenne entre 0,4 et 0,7m). L'aquifère renferme une nappe de qualité excellente à l'exception des points d'eau localisés à la lisière du fleuve Saloum et de l'estuaire mais également de points d'eau contaminés localement par les activités domestiques et/ou pastorales autour des puits.

- Les potentialités de la nappe et le potentiel exploitable ont été investigués par modèle et plusieurs scénarios d'exploitation ont été testés avec la création de nouveaux champs captant. Sur ces 3 champs captant, deux ont été testés par des forages. Les scénarios de pompage, les débits au niveau des forages de même que les rabattements induits ont montré un potentiel très important pour le transfert vers les zones déficitaires. Les bilans d'eau et plus particulièrement les termes d'échange avec les limites du système montrent que les flux d'entrée des eaux salées sont relativement limités; toutefois pour les besoins de préservation de la ressource un dispositif de surveillance devrait être mis en œuvre. Pour cela, les recommandations suivantes sont formulées pour l'exploitation de l'aquifère du Continental Terminal par de nouveaux forages :
  - Un suivi régulier des niveaux de l'aquifère et de la qualité de l'eau devrait être mis en place sur toute son extension, et en particulier dans les zones identifiées comme étant à risque de dégradation de la qualité de l'eau;
  - Les sites d'implantation des nouveaux forages devraient être investigués par prospection géophysique (en ciblant les zones de résistivités moyennes et élevées) pour s'assurer des bonnes caractéristiques hydrauliques et d'une nappe de bonne qualité chimique. Cette recommandation permettrait surtout

d'éviter les forts rabattements observés lors des phases de simulation ;

- Une surveillance de l'évolution des niveaux piézométriques et de la qualité de l'eau de l'aquifère au cours du temps est nécessaire au droit des forages d'exploitation, mais aussi sur un réseau de piézomètres positionnés à proximité des champs captant. Ces piézomètres de surveillance doivent être positionnés en amont des captages dans les zones d'appel des forages, mais également en direction des zones d'eau salée proches (littoral ou poches d'eaux saumâtres), afin d'anticiper les risques de dégradation de qualité des eaux. A ce propos, nous recommandons l'implantation de piézomètres de surveillance selon le dispositif présenté dans la figure 47. Ces points sont positionnés là où aucun piézomètre ou forage existant n'était présent, et où des mesures sont nécessaires afin de prévenir les risques de dégradation de qualité des eaux. La création de ces ouvrages est particulièrement importante à proximité du littoral, en partie ouest de la zone étudiée.
- En termes de suivi à réaliser, en plus des mesures de niveaux d'eau et d'analyses chimiques des ions majeurs, il est intéressant de procéder sur ces ouvrages au relevé périodique de profils verticaux de conductivité électrique, en particulier à proximité du littoral.
- En effet ces profils verticaux permettent d'identifier la position d'une éventuelle interface eau douce / eau salée au sein de l'aquifère, et de suivre son évolution au cours du temps le cas échéant.

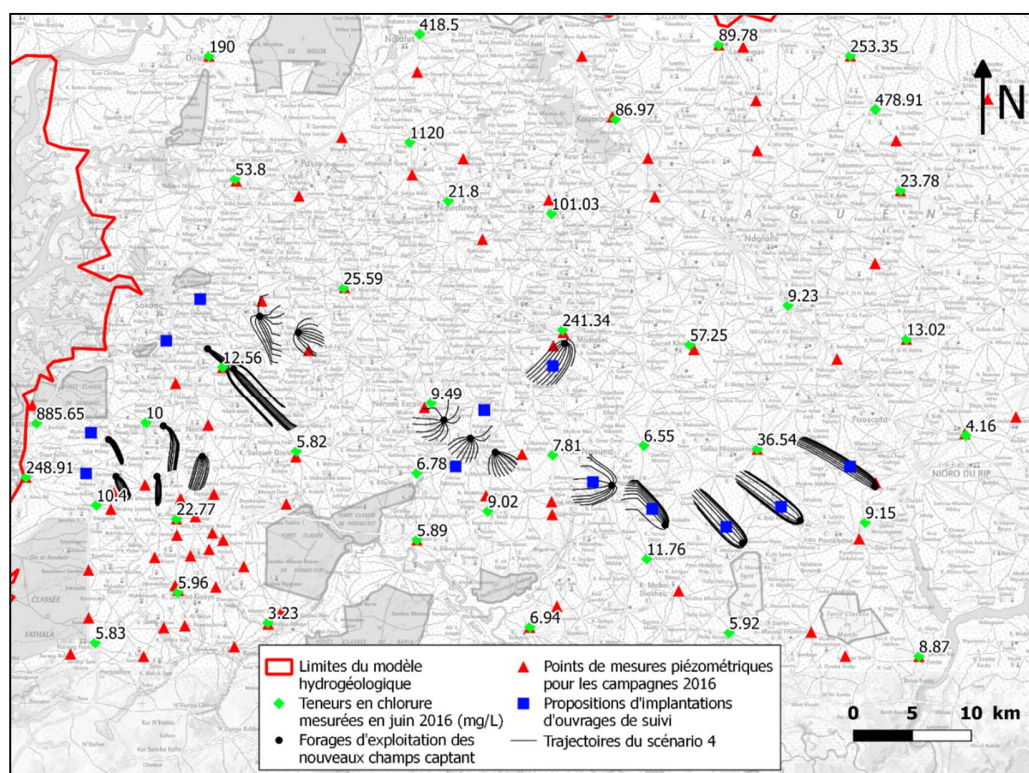


Figure 47: Proposition d'implantation d'ouvrages de suivi de la nappe à proximité des nouveaux champs captant