République du Sénégal
Un Peuple-Un But-Une Foi

Ministère de l'hydraulique et de l'assainissement

Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau (DGPRE)

DGPRE

Etude d'Evaluation des Potentialités des Ressources en Eau en vue d'Alimenter la zone de Cap Skiring

Rapport de synthèse final

Janvier 2017

HydroConcept

HYDROCONCEPT
ingénieurs - conseils

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES 3

LISTE DES TABLEAUX 4

1. INTRODUCTION ***6***

1.1. Rappel des objectifs du projet 6

1.2. Résultats attendus 7

2. BILAN DES ETUDES HYDROLOGIQUES, GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES DE LA ZONE DU PROJET ***7***

2.1. Localisation de la zone du projet 7

2.2. Géomorphologie 8

2.3. Géologie 9

2.4. Contexte hydrogéologie 10

2.5. Investigations hydrogéologiques dans la zone du projet 11

2.5.1. Résultats cartographiques 11

2.5.2. Résultats hydrogéologiques 11

2.5.2.1. Géométrie du réservoir 12

2.5.2.2. Configuration de l'écoulement 15

2.5.2.3. Caractérisation hydrochimique 17

3. BILAN DES RESULTATS DU MODELE ***21***

3.1. Besoin en eau de la zone du projet 21

3.2. Les résultats du modèle 23

3.2.1. Simulations réalisées 24

3.2.2. Résultats des simulations 25

3.2.3. Choix des sites d'implantation de nouveaux captages 30

4. CONCLUSION ***32***

5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ***33***

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : LOCALISATION DE LA ZONE DU MODELE 8

FIGURE 2 : RESEAU HYDROGRAPHIQUE ET BASSIN VERSANT EXTRAITS DU SRTM 9

FIGURE 3 : TOPOGRAPHIE DU MUR DE L'AQUIFERE 13

FIGURE 4 : DISTRIBUTION DE L'EPAISSEUR DE L'AQUIFERE 14

FIGURE 5 : DISTRIBUTION DES VALEURS DE NIVEAU STATIQUE DE LA NAPPE 15

FIGURE 6 : PIEZOMETRIE DE LA NAPPE DU CT DANS LA ZONE DU PROJET . 16

FIGURE 7 : CARTE DE REPARTITION DES CONDUCTIVITES ELECTRIQUES . 18

FIGURE 8 : REPARTITION DES TENEURS EN NITRATE DANS LA ZONE DU PROJET 20

FIGURE 9: TYPOLOGIE DES EAUX DE LA NAPPE 21

FIGURE 10 : CARTE PIEZOMETRIQUE APRES SIMULATION (2026) 26

FIGURE 13 : CARTE PIEZOMETRIQUE APRES SIMULATION (2036) 27

FIGURE 11 : CARTE PIEZOMETRIQUE APRES SIMULATION (2036) 27

FIGURE 13 : ZONES POTENTIELS D'IMPLANTATION DE FORAGES 31

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 : STATISTIQUE DESCRIPTIVE DES VALEURS DE PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES 17

TABLEAU 2 : STATISTIQUE DES PARAMETRES CHIMIQUES DE LA NAPPE DU CT DE CAP SKIRING ET LES NORMES DE POTABILITE DE L'OMS..... 19

TABLEAU 3 : ESTIMATION ET EVOLUTION DES BESOINS EN EAU DANS LA ZONE DU PROJET 21

TABLEAU 4 : BILAN HYDRIQUE CALCULE EN M^3/J EN 2026..... 25

TABLEAU 5 : BILAN HYDRIQUE CALCULE EN M^3/J EN 2036..... 25

TABLEAU 7 : BILAN HYDRIQUE CALCULE EN M^3/J EN 2026..... 30

TABLEAU 8 : BILAN HYDRIQUE CALCULE EN M^3/J EN 2036..... 30

ANNEXE III : REPARTITION DES FORAGES PAR ZONES (LES FORAGES POMPES AU NIVEAU DES SCENARII D'EXPLOITATION RATIONNELLE DE LA NAPPE SONT EN GRAS..... 39

Liste des acronymes

AEP: Approvisionnement en Eau Potable

CE: Conductivité Électrique

CT : Continental Terminal

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

MNT : Modèle numérique de terrain

SRTM : Shuttle topographic Radar Mission

1. INTRODUCTION

Le présent rapport constitue le **"Rapport de synthèse final",** conformément aux termes de référence de l'étude portant «***Etude d'Evaluation des Potentialités des ressources en Eau en vue d'Alimenter la Zone de Cap Skiring***». Il fait une synthèse du contenu des rapports thématiques portant sur :

- l'étude hydrogéologique et hydrologique de la zone de Cap Skiring ;
- la modélisation mathématique simplifiée pour une gestion et une planification des ressources en eau dans la zone du projet.

Le rapport de synthèse est articulé autour des points suivants :

- la présentation des différentes phases de la mission, les objectifs, les résultats attendus et les activités conduits par le consultant ;
- le bilan des études hydrogéologiques et hydrologiques;
- les principaux résultats du modèle numérique ;
- les conclusions et recommandations.

1.1. Rappel des objectifs du projet

Ce projet d'étude hydrogéologique et hydrologique est financé par l'État du Sénégal dans le cadre de son Budget de Consolidation et d'Investissement (BCI) 2016. Il a pour objectif global une évaluation des potentialités de la nappe du CT en vue d'alimenter la zone de Cap Skiring. Ainsi, les objectifs spécifiques visent :

- une actualisation des connaissances hydrogéologiques par des investigations tomographique, de nivellement et une analyse chimique des eaux de la nappe du CT ;
- la réalisation d'un modèle mathématique qui permet d'optimiser les débits pompés et de mieux comprendre les relations nappe/mer et nappe/eaux sursalées des «bolongs».

Ces objectifs du projet permettent d'aboutir à des résultats qui portent sur :

- la description de la méthodologie de travail d'une part et d'autre part sur l'interprétation des données de la campagne hydrogéologique, tomographique et du nivellement topographique afin de mieux caractériser la géométrie de l'aquifère ;
- l'étude du fonctionnement hydrodynamique de la nappe du CT (recharge, interactions entre nappe/mer, nappe/«bolong») et l'évaluation des potentialités des ressources en eau souterraine mobilisables.

1.2. Résultats attendus

Les résultats attendus sont les suivants :

- les ressources en eau souterraine de la nappe du CT sont identifiées et caractérisées aux plans quantitatif et qualitatif ;
- les besoins en eau potable des populations et du secteur touristique dans le secteur sont évalués;
- le fonctionnement hydraulique du système et les termes d'échanges de flux (exploitation, recharge et relation nappe/mer et nappe/«bolongs») sont établis ;
- un modèle simplifié ainsi que des outils prenant en compte les spécificités de la région et permettant une gestion prévisionnelle des ressources en eau souterraine sont conçus et validés.

2. Bilan des études hydrologiques, géologiques et hydrogéologiques de la zone du projet

2.1. Localisation de la zone du projet

La zone d'étude se situe au Sud-Ouest du Sénégal et appartient à la commune rurale de Diembéring qui fait partie du département d'Oussouye dans la région de Ziguinchor. Cette commune comprend 21 villages sur une superficie de 237 km^2. La zone du projet, qui occupe une superficie de 52 km^2, soit 22 % de la superficie de la commune, est limitée à l'ouest par l'océan atlantique, à l'est par les zones marécageuses salées les « bolongs», au sud par la frontière bissau-guinéenne et au nord par le système de cordon dunaire de Nikine-Diembéring (Figure 1).

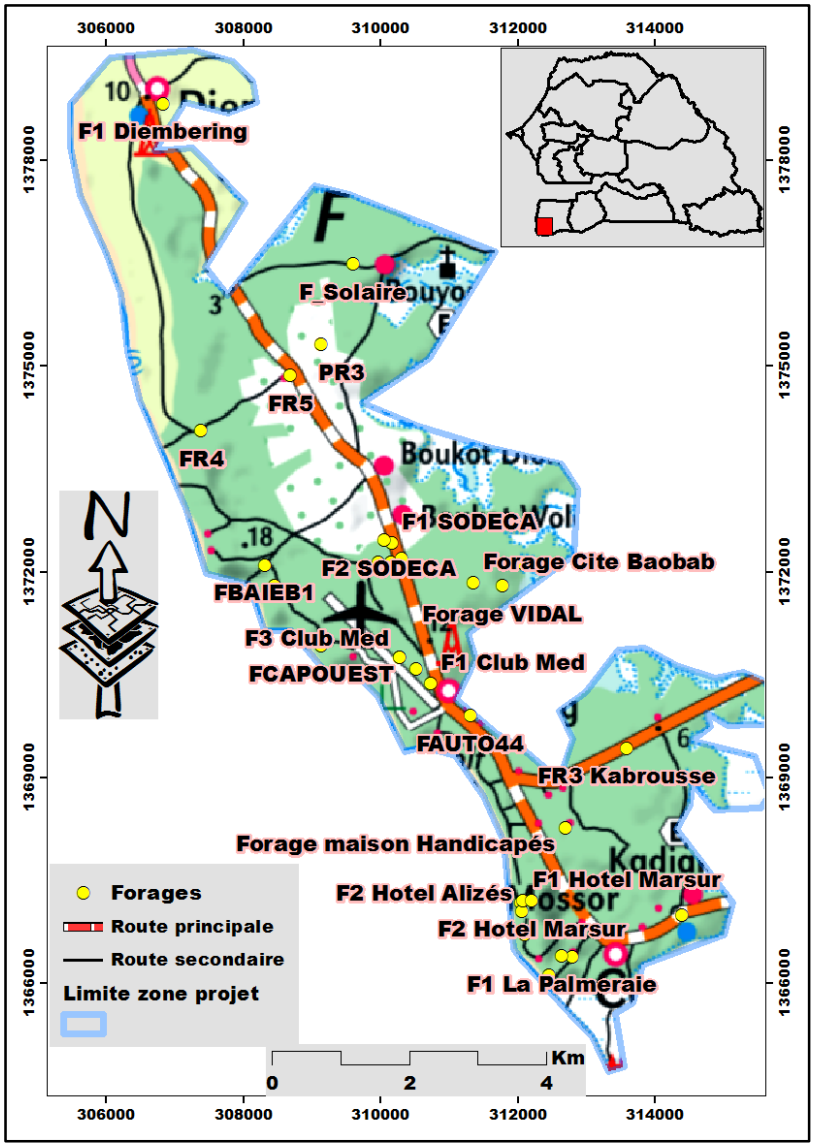


Figure 1 : Localisation de la zone du modèle

2.2. Géomorphologie

Du point de vue géomorphologique, la zone de Cap Skiring présente dans son ensemble un relief plat. Elle appartient à la Basse Casamance où les affluents des principaux marigots, qui prennent l'appellation de «bolongs», forment un réseau très dense en doigts de gant, qui entaille très profondément le plateau du Continental Terminal.

Le réseau hydrographique est essentiellement constitué par un réseau de petits ruisseaux qui permettent de drainer les eaux de ruissellement vers les «bolongs» et la mer. Ce réseau de drainage temporaire est bien représenté et permet d'évacuer l'essentiel des eaux de ruissellement vers les «bolongs». Les bassins versants de la zone du projet, extraits à partir du SRTM, présentent des superficies relativement faibles (figure 2).

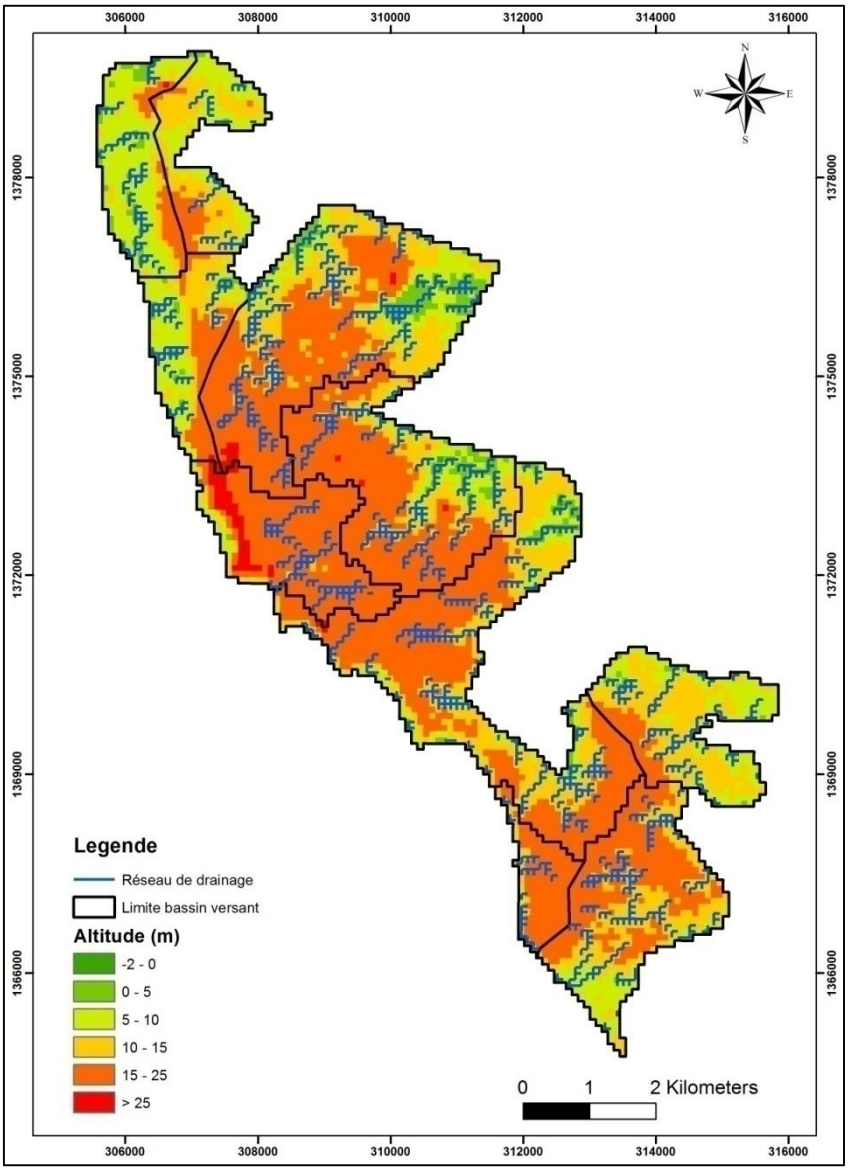


Figure 2 : Réseau hydrographique et bassin versant extraits du SRTM

2.3. Géologie

La synthèse hydrogéologique de la Casamance permet de distinguer quatre ensembles lithostratigraphiques qui sont de bas en haut (Lepriol, 1983) :

- les formations secondaires du Crétacé supérieur qui sont des formations sableuses, sablo-argileuses et argileuses dont le sommet est constitué par un niveau de sables grossiers. Ces formations correspondent à la partie supérieure du Crétacé encore appelée Maastrichtien ;
- les formations lutétiennes et anté-lutétiennes sont essentiellement constituées de calcaires marneux ou gréseux à silex et de marnes plus ou moins sableuses. Cette formation présente également d'abondants niveaux calcaires compacts ;

- les formations post-lutétiennes dont les parties inférieures sont constituées d'une alternance d'argiles plus ou moins sableuses et de sables. Ils présentent des niveaux charbonneux (lignite) et son faciès est essentiellement de couleur gris-clair, gris-bleu et noire. Sa partie supérieure correspond aux formations d'altération, appelées Continental Terminal, contenant la nappe d'eau phréatique. Ces formations du CT sont constituées d'argiles sableuses et de sables argileuses de couleur rouge d'âge Miocène supérieur à Quaternaire.

Cependant, le continental terminal est essentiellement constitué dans la zone de grés argileux qui comportent (Dieng, 1965) :

- une assise supérieure que l'on trouve souvent à l'affleurement et qui est formée de grès argileux blancs-rouille, avec, en profondeur, des grès rubanés et de grès bariolés ;
- une assise inférieure que l'on observe dans les puits ou sondages et qui est formée d'argiles schisteuses associées, soit à des limons ferrugineux, soit à des sables ferrugineux rougeâtres.

Dans la zone de Cap Skiring, les dépôts du Continental Terminal ont été modelés en glacis au cours d'une période aride il y a un demi-million d'années (Michel, 1973). Ils présentent actuellement un relief mollement ondulé, altéré par la pédogenèse ferralitique (cuirasse gréso-ferrugineuse de Boucotte et du Cap-Skiring). Des plateaux très découpés (plateau d'Oussouye et de Diembéring) dominent faiblement (15 à 30 m) la zone sédimentaire actuelle.

2.4. Contexte hydrogéologie

Sous le Bassin de la Casamance, on rencontre trois aquifère superposés qui sont de bas en haut (Gouze, 1961; Debuisson et al, 1969) :

- l'aquifère profond du Maastrichtien est constitué de sables à sables argileux de bonne productivité au Nord et au centre du Sénégal. Son toit plonge vers le sud-ouest et prend la forme d'une cuvette dont le fond se situe, en Basse Casamance, entre les cotes -500 et -600 m IGN (Lepriol, 1983). L'aquifère atteint 95 m de puissance à Kartiak en Basse Casamance. Dans la zone de Cap Skiring, le Maastrichtien est caractérisé par des faciès marno-argileux rendant la nappe peu ou pas productif et par des eaux saumâtres ;
- l'aquifère semi-profond constitué en Casamance par l'ensemble des formations argilo-sableuses, post-lutétiennes (de l'Eocène supérieur au Pliocène) qui se sont déposées dans de vastes cuvettes creusées dans les marnes et les calcaires de l'Eocène moyen et inférieur. Cet aquifère est essentiellement marneux à marno-calcaire et à eaux saumâtres dans la zone de Cap Skiring ;
- l'aquifère superficiel du Continental Terminal se trouve à quelques décimètres du sol aux abords des marigots et à une trentaine de mètres de profondeur sous les plateaux. Elle est captée

par des puits villageois traditionnels et les forages et joue un rôle très important dans l'hydraulique villageoise. Le niveau statique se trouvant vers +20 m sous les plateaux et vers 0 m au niveau des bas-fonds, l'épaisseur de l'aquifère saturée est d'environ 25 m sous le plateau et 20 m sous les terrasses.

Les paramètres hydrodynamiques de la nappe sont variables du fait de l'hétérogénéité de la formation aquifère. Les valeurs de perméabilité et de transmissivité varient respectivement entre 5.10^{-5} et $1,5.10^{-4}$ m/s et $0,7.10^{-3}$ et 40.10^{-3} m^2/s. Quand au coefficient d'emmagasinement, il a été estimé à 10% (Lepriol, 1983). Cependant, les valeurs de perméabilité permettant de caler le modèle hydrogéologique sont relativement plus faibles et varient entre 2.10^{-7} et 5.10^{-5} m/s.

2.5. Investigations hydrogéologiques dans la zone du projet

Les investigations hydrogéologiques, tomographiques et topographiques visent plus particulièrement à définir la géométrie et le fonctionnement du système nappe/mer et nappe/bolongs de la zone de Cap Skiring. Elles concernent la collecte des données existantes et l'acquisition des données thématiques complémentaires qui ont mobilisé sur le terrain les experts hydrogéologue, géophysicien, topographe et hydrologue de HydroConcept et d'un agent de la DGPRE. Cette phase de collecte de données a été suivie d'un traitement, d'une analyse et d'une interprétation de ces données pour définir et mieux comprendre le fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique du système et pour établir le modèle conceptuel. Les rapports 2 et 3, soumis au client, traitent des méthodes d'acquisition et de traitement des données. Ainsi, dans les paragraphes suivants, nous présentons les principaux résultats issus de ces investigations.

2.5.1. Résultats cartographiques

Les investigations cartographiques ont été conçues à partir des données de la campagne de nivellement topographique qui a été réalisée sur un réseau de 218 ouvrages dont 33 forages et 185 puits ;

Ces données ont été vectorisées et intégrées dans Arc GIS. Elles ont permis d'obtenir :

- les cartes de base servant de carte de fond pour les interprétations hydrogéologiques ;
- la carte d'altitude de la zone qui a permis de convertir les données des valeurs du mur et d'épaisseur de la nappe en référence au zéro IGN.

2.5.2. Résultats hydrogéologiques

Les données acquises concernant l'hydrogéologie ont permis de définir :

- la géométrie du réservoir ;
- la configuration de l'écoulement de la nappe et ses relations avec la mer et les «bolongs» ;
- les caractéristiques hydrodynamiques.

2.5.2.1. Géométrie du réservoir

La géométrie du réservoir a été déduite des données obtenues lors de la prospection tomographique dont l'interprétation des résultats s'est appuyée sur les logs des forages profonds. Il s'agissait ainsi de déterminer et de caractériser la nature de la formation aquifère. Pour chaque profil tomographique réalisé sur le terrain (30 au total), les coordonnées géographiques, le nivellement topographique, le mur argilo-marneux de même que les épaisseurs ont été déterminés en rapport avec les valeurs de résistivités exprimées en ohm.m^{-1}. L'altitude du mur de l'aquifère ainsi obtenu montre des zones où les cotes du mur sont moins profondes et comprises entre -15 et -20 m localisées au Nord et au Sud du système. Cependant, les plateaux correspondent aux endroits où le mur de la nappe est plus profond. Il se situe entre les cotes de - 38 et -46 m au niveau des plateaux de Bouyouye, Boucot et Kabrousse (Figure 3).

Ainsi, la nappe étant libre, l'altitude des points issus du nivellement topographique a permis de représenter le toit de la nappe. La zone présente trois plateaux dont ceux de Bouyouye, Boucot et Kabrousse où les altitudes tournent autour de +20 m. Ce relief diminue vers la mer et les «bolongs».

Ces données d'altitude du toit et du mur ont permis de calculer l'épaisseur de l'aquifère dans la zone étudiée. Les valeurs d'épaisseur ainsi obtenue varient de 20 m à Diembéring, 40 m à Bouyouye et 60 m à Kabrousse. Cette variation montre un épaississement de la nappe dans les zones de plateau du fait de l'enfoncement du substratum argileux et de la topographie haute aux niveaux de ces endroits (figure 4).

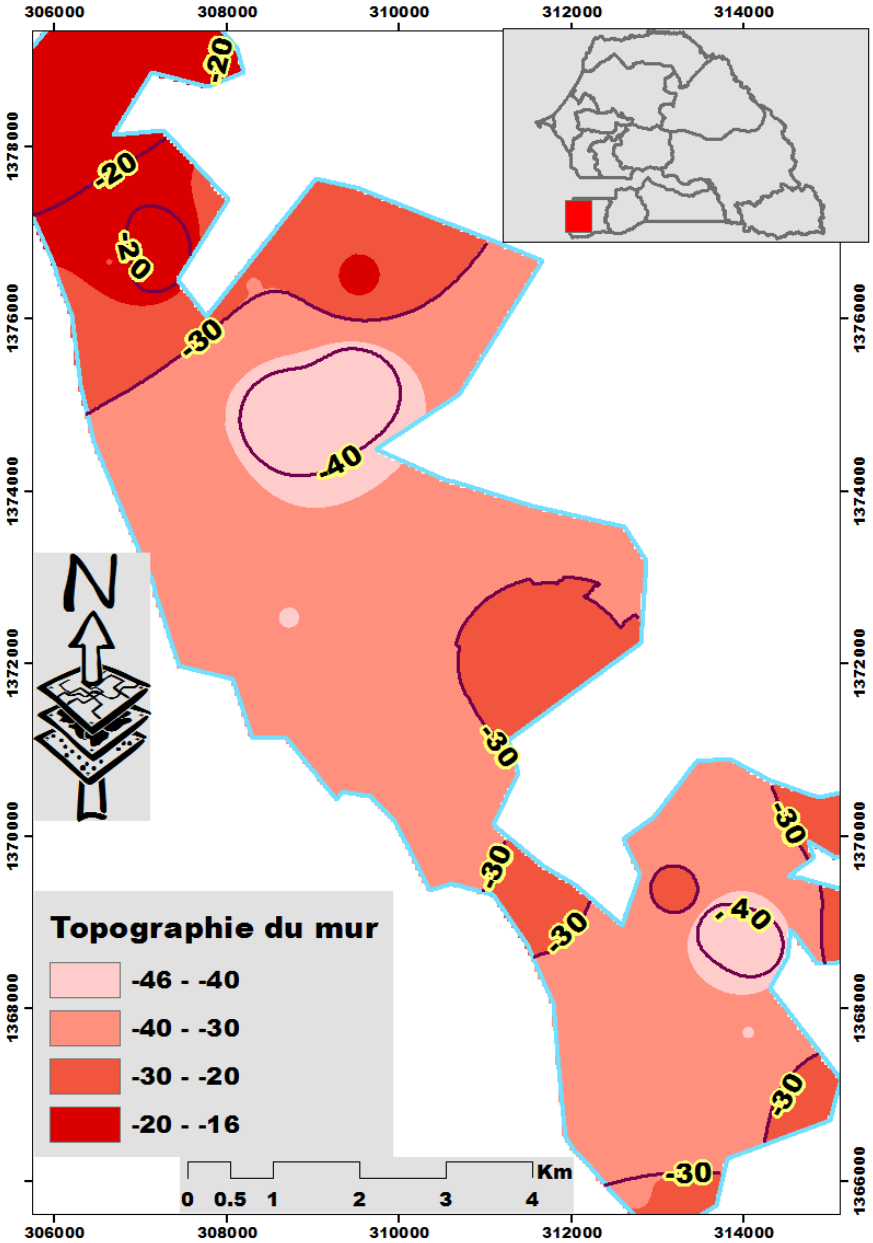


Figure 3 **:** Topographie du mur de l'aquifère

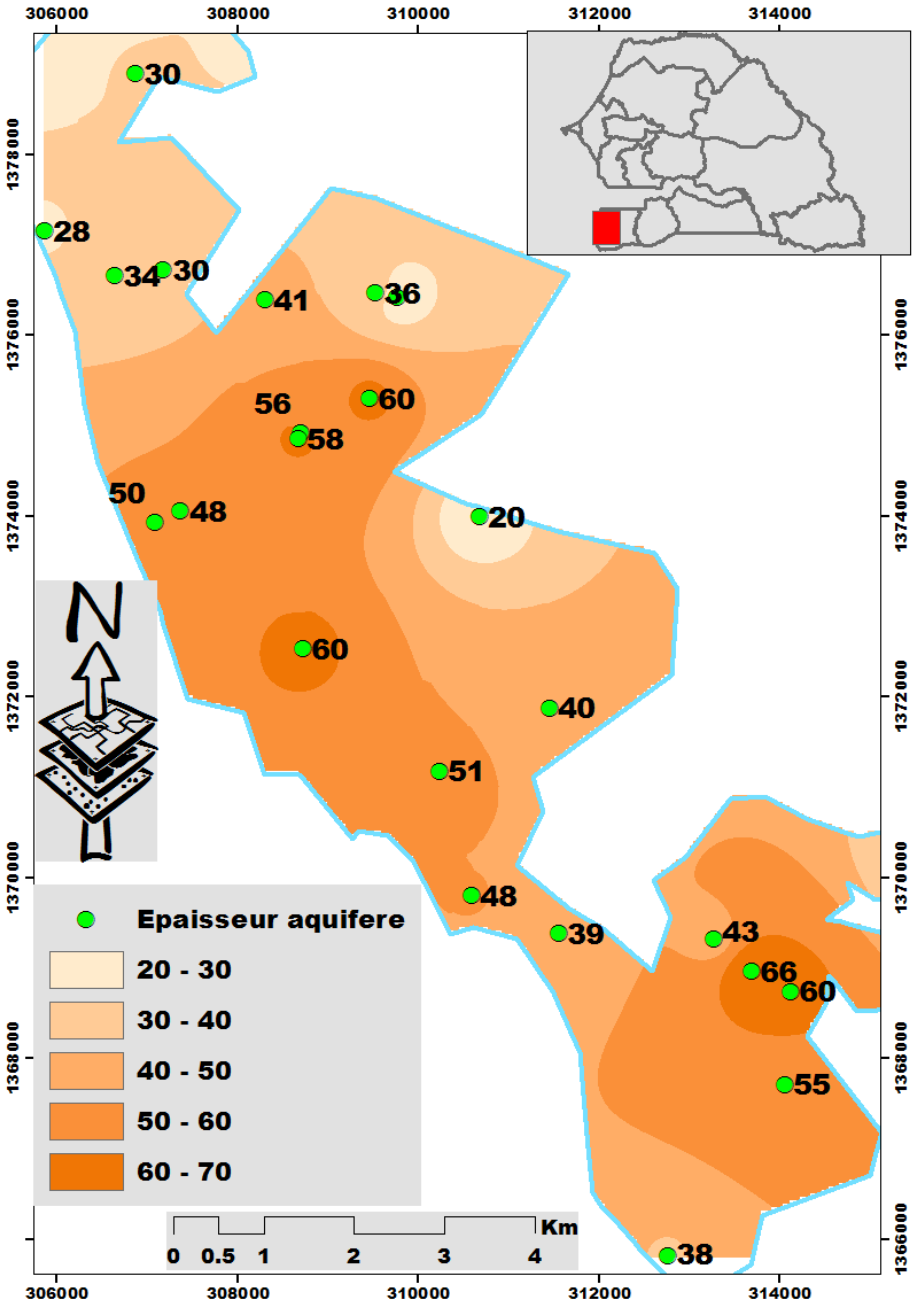


Figure 4 **:** Distribution de l'épaisseur de l'aquifère

2.5.2.2. Configuration de l'écoulement

Données de base

Les mesures du niveau de la nappe proviennent de la campagne réalisée en Aout 2016 sur un réseau de 218 ouvrages constitué de 33 forages et 185 puits.

Distribution des valeurs de niveau statique

Ainsi, les mesures de niveau statique sont plus nombreuses dans les puits que celles effectuées sur les forages. Ces valeurs de niveau statique montrent des profondeurs de nappe variant entre 0,7 m et 15,3 m (Figure 5) avec la plupart des valeurs comprises entre 3 et 9 m. Les profondeurs d'eau les plus élevées s'observent au niveau des plateaux tandis que les faibles valeurs sont notées aux environs des «bolongs».

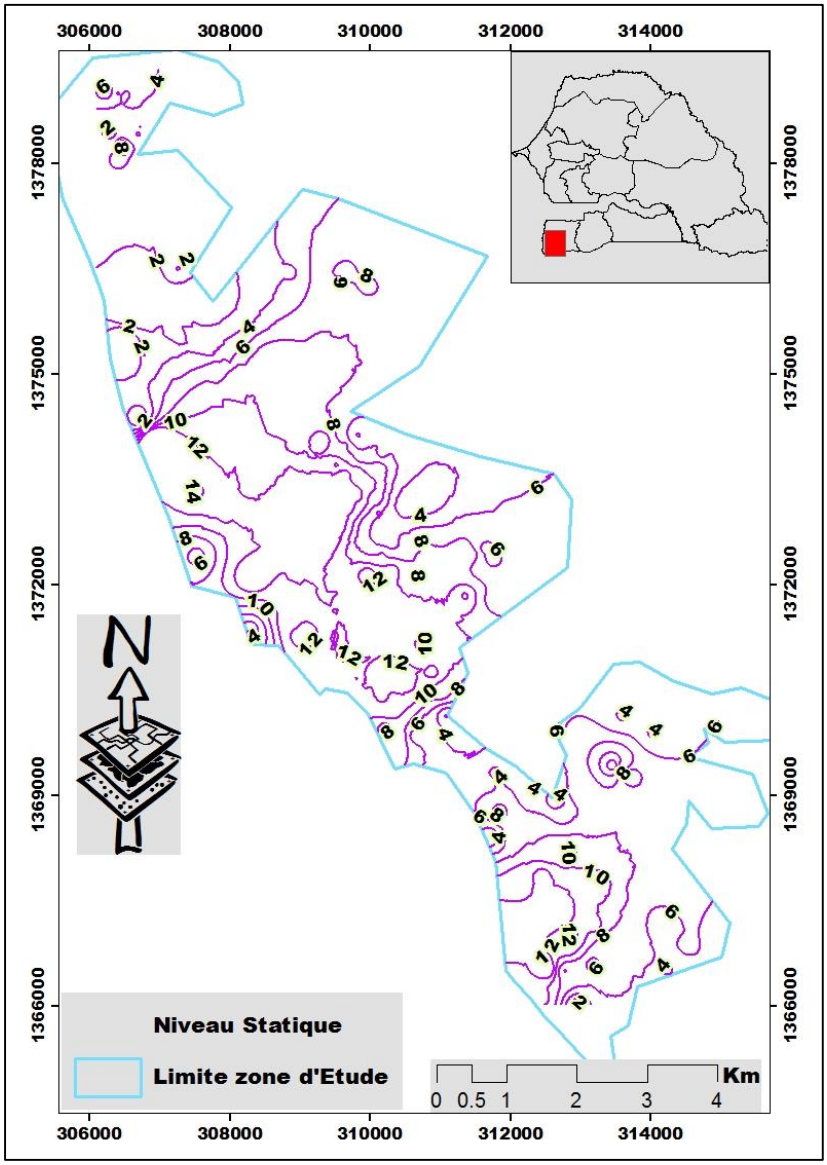


Figure 5 **:** Distribution des valeurs de niveau statique de la nappe

Distribution des valeurs de niveau piézométrique

Les valeurs de NP, calculées à partir des mesures des niveaux statiques et des cotes topographiques, sont très variables. Elles sont de l'ordre de 0 m au nord vers la localité de Diembéring et le long de la mer. Elles atteignent 2 m dans la partie centrale et une valeur maximale de 5 m dans la partie Sud-est. Cette piézométrie de la nappe montre des dômes piézométriques axés autour des forages FR4 au centre ouest et FR5 de Kabrousse situé au Sud-est du secteur (Figure 6).

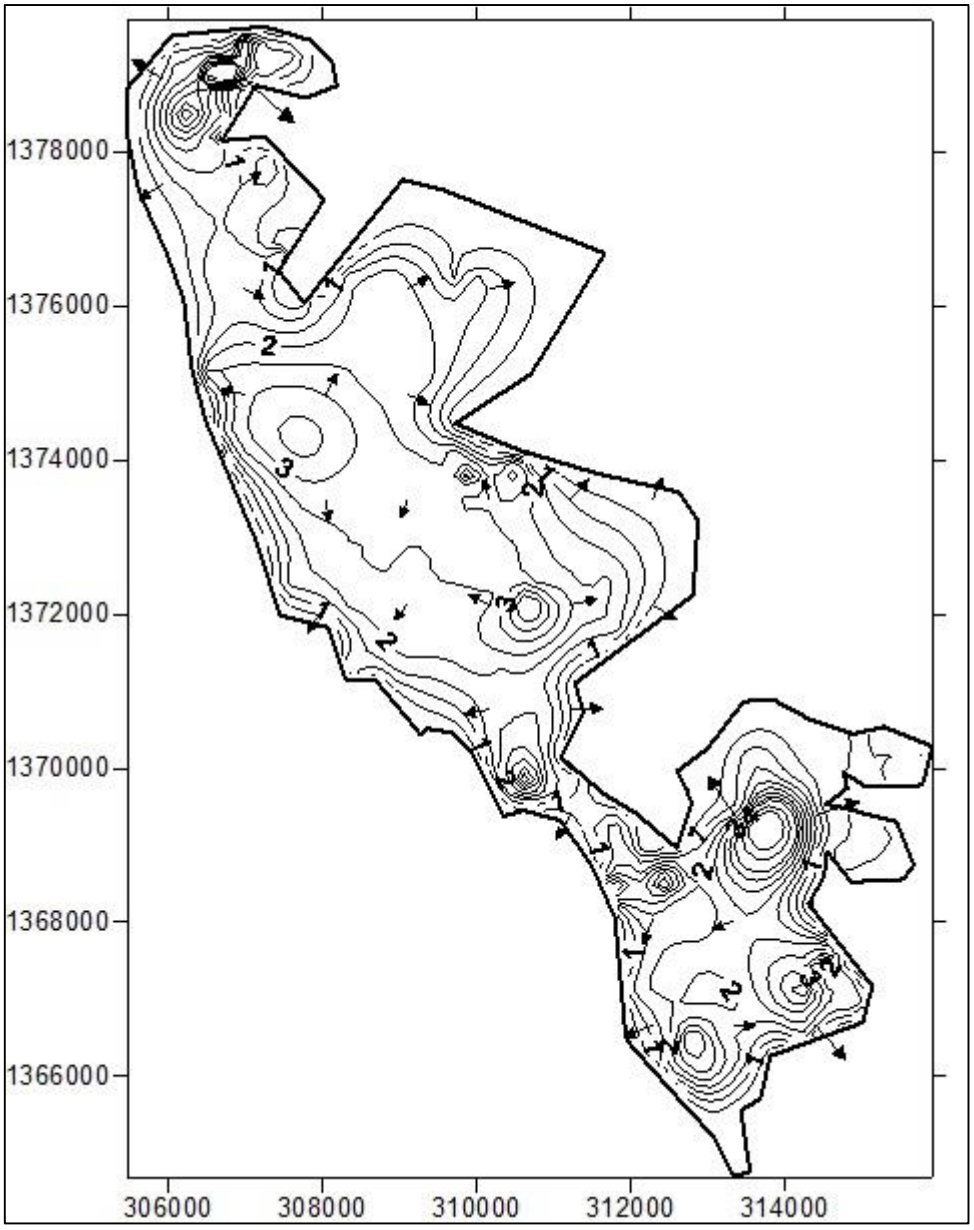


Figure 6 : Piézométrie de la nappe du CT dans la zone du projet

2.5.2.3. Caractérisation hydrochimique

Données de base

Des échantillons d'eau ont été recueillis lors de la campagne d'Aout 2016 puis ces échantillons ont été analysés au niveau du laboratoire d'hydrochimie de l'UCAD. Cette caractérisation hydrochimique est relative à une mesure des paramètres physico-chimiques (pH, CE, T°) réalisée sur site et à la détermination des concentrations en éléments majeurs (HCO_3, Cl, NO_3, SO_4, Ca, Mg, K, Na).

Caractéristiques physico-chimiques

Le tableau 1 résume statistiquement les valeurs de ces paramètres physico-chimiques mesurés sur un réseau de 185 points d'eau.

Tableau 1 : Statistique descriptive des valeurs de paramètres physico-chimiques

	Minimum	Maximum	Moyenne	Normes OMS (1972)
pH	6.67	9.47	8.31	6.6 – 9.2
T° (ºC)	26.27	29.88	28.23	25
CE (µS/cm)	43.00	1456.00	365.69	2000

Les valeurs de température mesurées reflètent la température ambiante au moment de la prise d'échantillons. Les faibles valeurs 26.27°C ont été obtenues pour les échantillons collectées le matin, tandis que les valeurs élevées 30 °C reflètent les échantillons collectés en mi-journée. La valeur moyenne est de 28.23°C.

Les eaux de la nappe présentent un pH relativement basique avec des valeurs qui varient entre 6 et 9.5. La comparaison des valeurs de pH des eaux de la nappe avec celles de l'OMS montre que les eaux de la nappe présentent des valeurs de pH acceptables. Quand aux conductivités électriques, elles présentent des valeurs relativement élevés au niveau des forages d'exploitation localisés dans les zones fortement habités. Ainsi, ces eaux chargées seraient certainement liées à une pollution anthropique. Les faibles valeurs de conductivités électriques s'observent dans les zones situées entre les plateaux de Bouyouye et Boucot (figure 7).

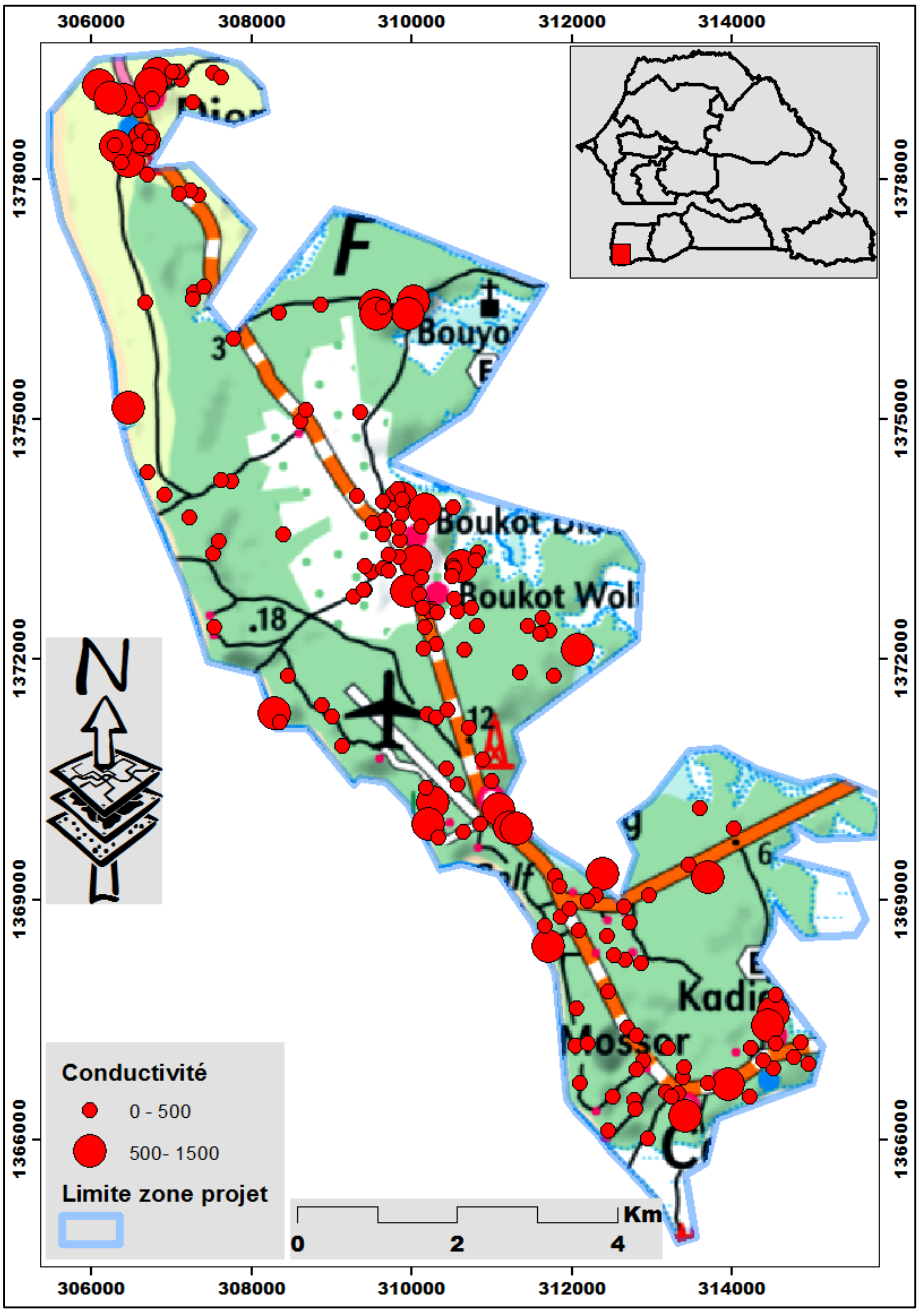


Figure 7 **:** Carte de répartition des conductivités électriques

Caractérisation chimique de la nappe du CT

L'étude chimique des eaux de la nappe du CT a été réalisée dans le but d'identifier les zones à forte pollution et à intrusion saline. Ainsi, cinq échantillons d'eau ont fait l'objet d'une analyse complète portant sur les ions majeurs. Cependant, les nitrates ont été analysés sur un réseau de 28 ouvrages.

Les concentrations en chlorures des eaux de la nappe varient entre 91 et 298 mg.l^{-1} (Aout 2016) (Tableau 2) avec de fortes teneurs observées dans les secteurs proches de la mer et des «bolongs».

Tableau 2 : Statistique des paramètres chimiques de la nappe du CT de Cap Skiring et les normes de potabilité de l'OMS

Paramètres	Maximum	Minimum	Moyenne	Normes OMS (1972)
Cl^-	297.59	91.63	196.89	200
HCO_3^-	442.25	61.00	186.81	
NO_3^-	301.11	0.04	43.94	50
SO_4^{2-}	100.32	9.32	54.63	250
Na^+	183.04	46.90	128.27	100
K^+	51.60	3.76	19.33	12
Ca^{2+}	140.73	36.06	81.22	100
Mg^{2+}	37.45	3.94	20.95	50

Les teneurs en nitrate sont très variables d'un point à un autre ; elles sont comprises entre 0.04 et 302 mg.l^{-1} avec une concentration moyenne de 44 mg.l^{-1}. Elles sont généralement inférieures à 50 mg.l^{-1} correspondant à la norme maximale admissible pour les eaux de boissons. Les zones qui présentent des valeurs élevées se localisent dans la zone de concentration des forages du Club Méditerranée, au nord à Diembéring et au Sud dans la localité de Cap Skiring (Cap Erucken). Ces fortes teneurs en nitrate dans la zone d'habitation suggèrent une pollution d'origine anthropique liée à l'urbanisation. Leur distribution spatiale montre également des valeurs généralement faible comprises entre 0 et 50 mg/l (figure 8).

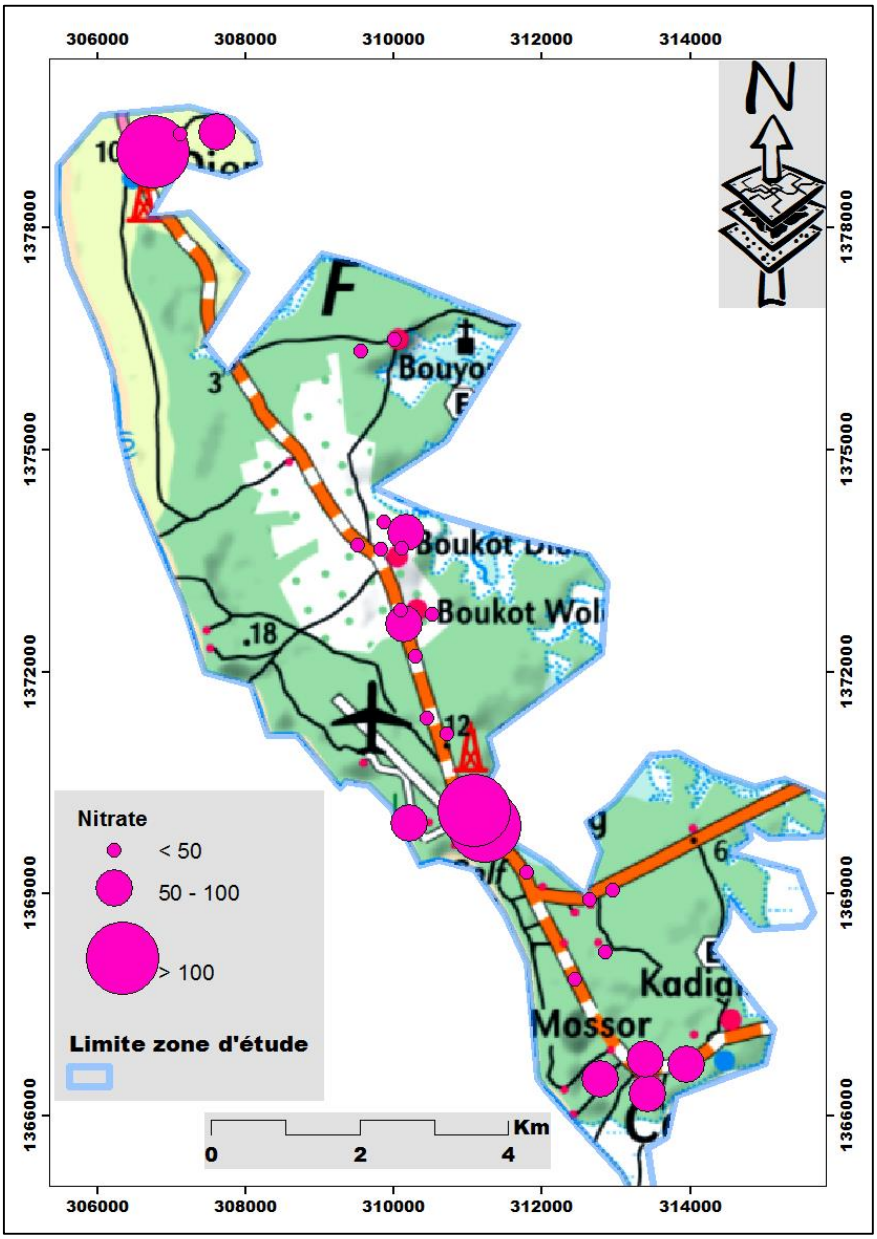


Figure 8 **:** Répartition des teneurs en nitrate dans la zone du projet

Les données chimiques ont été également introduites dans le diagramme de Piper pour déterminer les types d'eau (Figure 9). Ce type de diagramme permet une discrimination des types d'eaux présentes dans les systèmes marqués par la prédominance de certains ions par rapport aux autres. Les résultats montrent que les eaux de la nappe présentent essentiellement un faciès chloruré calcique et magnésien. Les faciès chloruré sodique et potassique et bicarbonaté calcique et magnésien sont également observés dans la zone.

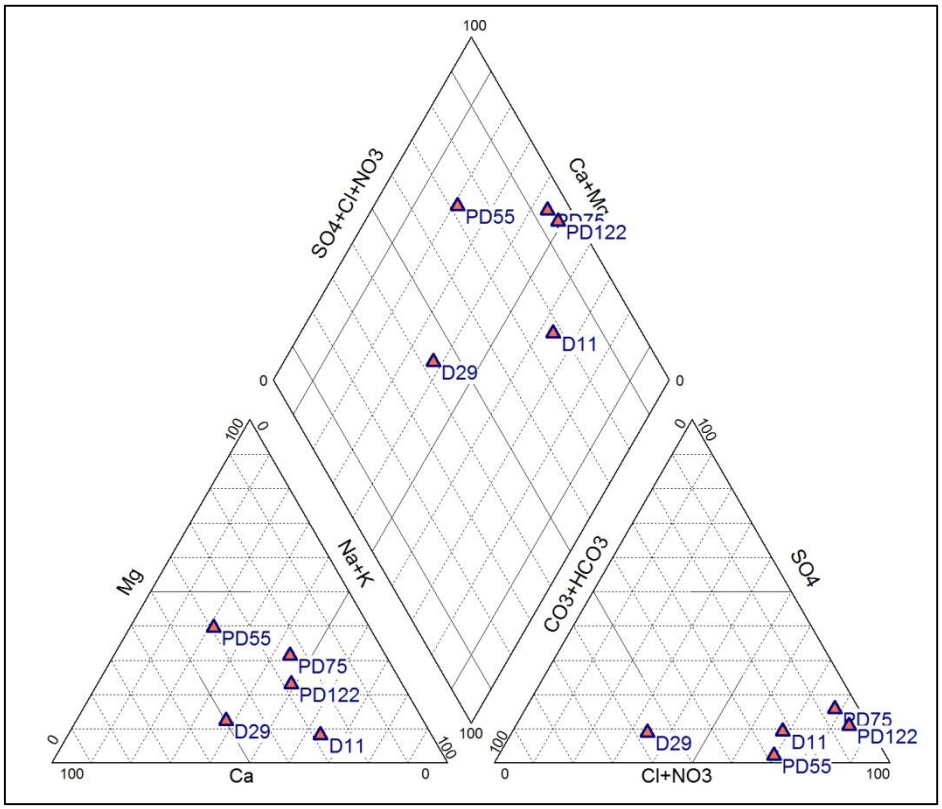


Figure 9: Typologie des eaux de la nappe

3. BILAN DES RESULTATS DU MODELE

3.1. Besoin en eau de la zone du projet

Les besoins en eau de la zone du projet ont été estimés en prenant en compte l'évolution de la population des différentes localités de la zone, en considérant un taux d'accroissement annuel de 2.7% (ANSD, 2015) et la capacité d'accueil des hôtels qui y sont implantés. Au niveau des hôtels, les besoins en eau ont été calculés en prenant en compte la durée de la saison touristique (environ 7mois) mais également en considérant un fonctionnement optimal des hôtels implantés dans la zone. Ces besoins augmentent d'environ de 620 m^3/j entre 2016 et 2036. Cependant, le niveau de consommation en eau devrait être en deçà des débits prévisionnels surtout en 2016 du fait des nombreuses difficultés que connait le secteur touristique dans la zone étant donné que plusieurs hôtels ont été totalement délabrés et fermés lors de la campagne d'Aout 2016. Dans le cadre de la relance du secteur touristique contenue dans le programme Sénégal émergent, ces débits prévisionnels pourraient être atteint et même dépassés.

Tableau 3 : Estimation et évolution des besoins en eau dans la zone du projet

Zones	Villages et Hôtels	Besoins (m^3/j)		
		2016	**2026**	**2036**
1	Diembering	168.55	220	287
	Campement Casa	4	4	4
	Akine Dyioni Lodge	2.8	2.8	2.8
	Total besoins zone 1 (m^3/j)	**175.35**	**226.8**	**293.9**
2	Campement Eco Lodge	4.8	4.8	4.8
	Bouyouye	18.35	23.95	31.27
	Hôtel Maya	8	24	24
	Campement 1 et 2	5.6	11.2	11.2
	Total besoins zone 2 (m^3/j)	**37.05**	**66.95**	**71.27**
3	Club Med	334.4	334.4	334.4
	Cap Skirring (Cap Eruken)	348.50	454.88	593.75
	Hôtel le Balafon	9.2	9.2	9.2
	Hôtel le Mirage	8	8	8
	Hôtel Amigo Bay	13.2	15	15
	Résidence Cap Ouest	2.4	15.6	15.6
	Les Palétuviers	6.4	6.4	6.4
	Elevages Bovins	1.2	1.2	1.2
	Boucotte	77.07	100.6	131.31
	Résidence Baie de Boucotte	30	48	48
	Cap Océan	4	4	4
	Hôtel Aéroport	8	8	8
	Quai de pêche	**20**	**20**	**20**
	Hôtel Bolong Passion	**2.4**	**2.4**	**2.4**
	Sapeurs Pompiers	**1**	**1**	**1**
	Hôtel Cisco Center	**10.8**	**10.5**	**10.8**
	Gendarmerie	**3**	**3**	**3**
	Résidences Européennes de Boucotte	**2.5**	**2.5**	**2.5**
	Total besoins zone 3 (m^3/j)	**882.07**	**1044.68**	**1214.58**
4	Hôtel la Paillotte	36	36	36
	Campement Paradise	4.6	4.6	4.6
	Hôtel la Maison Bleue	7.2	7.2	7.2
	Hôtel Villa des pécheurs	5.2	5.2	5.2
	Hôtel le Marsus	17.2	17.2	17.2
	Les Alizés	19.2	19.2	19.2
	Campement Mussuwam	7.2	7.2	7.2
	Kabrousse	188.53	246.09	321.22
	Résidence La Palmeraie	12	12	12
	Résidence Hibiscus	20.4	20.4	20.4
	Club Golf	150	150	150

	Hôtel non stress	4	4	4
	Hôtel 6g	8	8	8
	Total besoins zone 4 (m^3/j)	**479.53**	**537.09**	**612.22**
	Total des besoins (m^3/j)	**1574**	**1875.52**	**2194**

3.2. Les résultats du modèle

A cause des contraintes hydrogéologiques dues aux manques de données de base, en l'occurrence le suivi du niveau et des pompages de la nappe, et suivant les objectifs poursuivis par la modélisation mathématique, le modèle conceptuel permettant de représenter au mieux le fonctionnement du système a été conçu comme suit :

- la prise en compte d'un système monocouche englobant depuis la surface du sol les sables secs, les sables latéritiques, les sables argileux ou argiles sableuses jusqu'au niveau des formations argileuses et imperméables de base. Ce choix de système monocouche est bien justifié dans ce système du fait de la continuité hydraulique ;
- le mur du système est représenté ici par les formations argileuses de base qui présentent une morphologie irrégulière suivant les zones mettant en évidence des zones de fortes épaisseurs localisées au niveau des plateaux. Le toit de l'aquifère est représenté par la topographie naturelle de la zone du projet ;
- l'aquifère est considéré comme libre et recevant une recharge directe provenant de l'infiltration des eaux de pluie;
- l'établissement d'un régime permanent d'Aout 2016 ne se justifie que par l'absence de chroniques de mesures dans la zone. Cependant, le calage de cette piézométrie a permis de restituer au mieux l'écoulement du système et de traduire les relations nappe/mer et nappe/«bolongs» ;
- la zone modélisée s'étend sur environ 16 km de long du plateau de Diembéring au Nord à la frontière guinéenne au sud de Kabrousse (Figure 2). De la mer vers les bolongs, elle présente une longueur maximale de 5 km. La configuration de l'écoulement du système se fait de part et d'autre des plateaux de Diembéring, Bouyouye, Boucot et Kabrousse vers la mer et vers les «bolongs».

Les conditions aux limites qui sont ainsi appliquées dans la zone à modéliser sont de type :

- condition de charges imposées (condition de Cauchy) le long de la mer où le niveau 0 IGN a été imposé sur les mailles bordant cette limite. Quand à la limite des «bolongs», l'interprétation de certains profils tomographiques et des cotes piézométriques obtenues à proximité de cette limite a permis d'y imposer une charge de 1 m.

- un flux imposé variable au niveau des mailles correspondantes aux forages et puits où les pompages sont bien connus.

Une discrétisation suivant un maillage régulier très fin de 10 x 10 m est appliquée dans toute la zone à modéliser du fait de sa faible extension.

Le modèle a été réalisé avec l'interface GMS Visual Modflow version 10.0 qui utilise le code de calcul Modflow développé par l'USGS (McDonald & Harbaugh, 1988). L'équation de diffusivité aux dérivées partielles des écoulements est résolue par ce code en différence finie par une combinaison de l'équation de continuité et de la loi de Darcy. GMS permet de simuler les écoulements en régime permanent ou transitoire d'un système hydrogéologique à géométrie variable, pouvant comporter une ou plusieurs couches, libres ou confinés. Les pompages, la recharge, l'évaporation qui constituent les débits d'échange avec l'extérieur peuvent être simulés et sont appliqués aux mailles du modèle. Les champs de perméabilité, de transmissivité et de coefficient d'emmagasinement sont également introduits aux mailles et ils peuvent varier suivant la lithologie du système à modéliser. Les différentes conditions aux limites de flux imposés (Neuman), de charges imposées (Dirichlet) et mixtes (Cauchy) permettent de matérialiser les échanges entre le domaine à modéliser et l'extérieur.

3.2.1. Simulations réalisées

Trois scénarios ont été retenus dans la phase d'exploitation du modèle mathématique. Les deux premiers scénarios visent surtout à comprendre le comportement de la nappe dans le cas d'une exploitation optimale de tous les forages implantés dans la zone (surtout les forages touristiques) pour satisfaire les besoins en eau des populations et du secteur touristique de la zone du projet à l'horizon 2026 et 2036. La morphologie des profils tomographiques réalisés à proximité des «bolongs» et de la mer (qui ont atteint le biseau salé) est combiné aux rabattements obtenues au niveau de ces points afin de quantifier de manière qualitative l'impact des pompages sur l'avancé de l'intrusion saline. Le dernier scénario vise une exploitation rationnelle de la nappe pour satisfaire la demande en eau potable des populations. Dans ce scénario, les forages localisés à proximité de la mer et des «bolongs» sont arrêtés et l'essentiel des pompages est concentré au niveau des plateaux.

Les débits de pompage de 3274 et 4200 m^3/j respectivement à l'horizon 2026 et 2036 ont été repartis sur l'ensemble des ouvrages pour comprendre le comportement de la nappe face à une forte sollicitation. Au niveau du troisième scénario, des débits correspondant aux besoins estimés à l'horizon 2026 et 2036 c'est-à-dire respectivement 1 900 et 2 200 m^3/j ont été pompés. Un champ de captage comportant 4 forages (F1, F2, F3 et F4) est également implanté au niveau

du plateau de Boucot pour renforcer l'alimentation en eau potable du Cap Erucken (Isthme de Cap Skiring).

Les simulations ont été réalisées en régime transitoire en considérant une baisse de la recharge de l'ordre de 10 et 20 % respectivement pour 2026 et 2036. Cette simulation pessimiste d'une baisse de la recharge se justifie par une diminution des cumuls pluviométriques annuels notés dans la zone depuis quelques décennies.

3.2.2. Résultats des simulations

Dans les deux premiers scénarios, tous les forages de la zone du projet sont pompés. Les résultats de ces simulations visant une exploitation maximale de la nappe montre une augmentation progressive des entrées d'eau aux limites. Cette entrée d'eau provenant des «bolongs» et de la mer augmente respectivement de l'ordre 290 et 373 m^3/j entre 2026 et 2036. Cette intrusion élevée en provenance de la mer est liée au pompage des forages touristiques qui jalonnent la mer. Cependant, on observe une baisse des pertes d'eau de 130 m^3/j en direction de la mer et de 657 m^3/j vers les «bolongs» entre 2026 et 2036 (tableaux 4 et 5).

Tableau 4 : Bilan hydrique calculé en m^3/j en 2026

Paramètres	In	Out
Recharge	6 680	0
Pompage	0	3 274
Echange vers la mer	182	514
Echange vers les «bolongs»	296	3 095
Bilan	7 158	6 883

Tableau 5 : Bilan hydrique calculé en m^3/j en 2036

Paramètres	In	Out
Recharge	5 825	0
Pompage	0	4 200
Echange vers la mer	555	384
Echange vers les «bolongs»	686	2 438
Bilan	7 066	7 022

Le suivi des cotes piézométriques au niveau des ouvrages localisés à proximité des limites montre que les baisses de -5.45 m se retrouvent au niveau des forages Club méditerrané. Les rabattements les plus élevés sont observés vers le Sud-ouest au niveau des forages F1 Alizé, F1 la Palmerais et à l'ouest du plateau de Bouyouye (PD 45). Au droit de ces forages, les cotes piézométriques atteignent -14 m. Ces pompages pourraient provoqués une intrusion marine provenant du nord-est ou sud-est étant donné que le profil tomographique réalisé vers le nord

(P18) intercepte le biseau salé à une profondeur par rapport au sol inférieur à 10 m (Tableau 6, figures 10 ; 11 ; 12 et Annexe II). Dans la partie sud-est, la baisse piézométrique est de l'ordre de 0.28 m où l'intrusion saline a été rencontrée à une profondeur relativement faible au sondage P24.

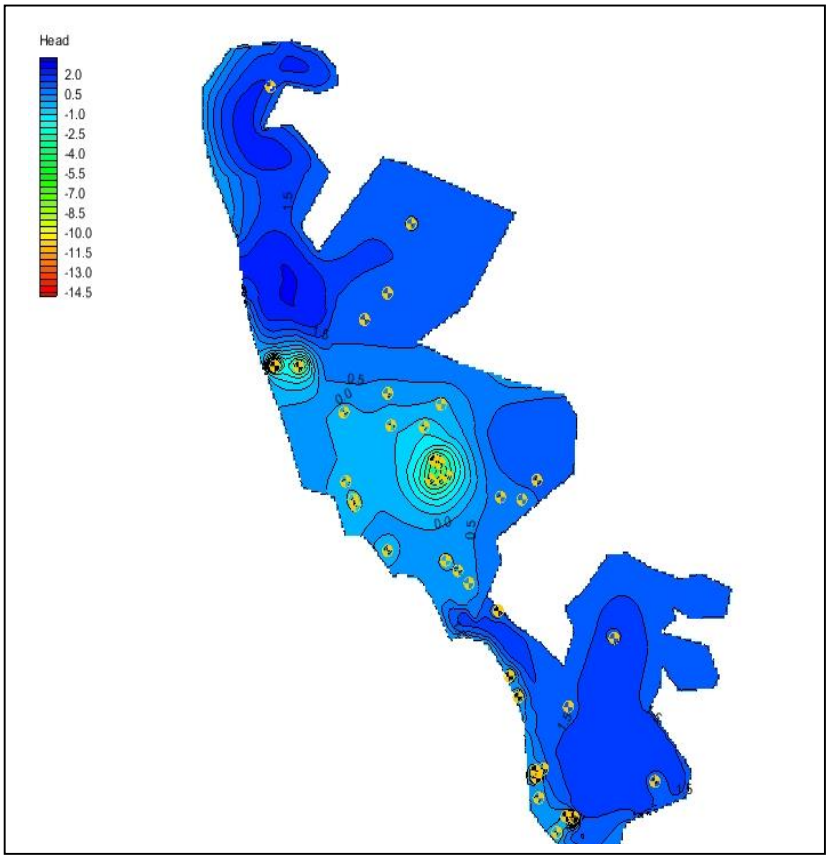


Figure 10 : carte piézométrique après simulation (2026)

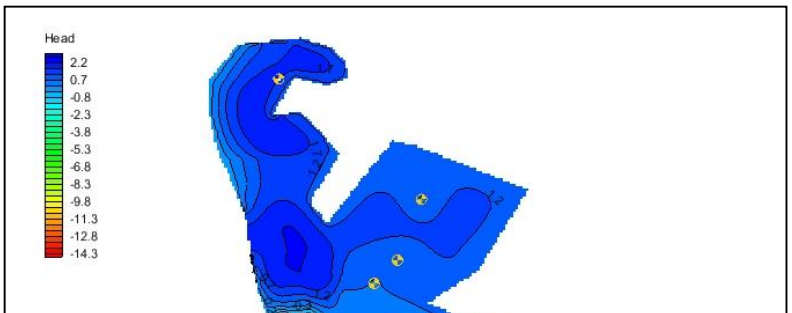


Figure 13 : carte piézométrique après simulation (2036)

Figure 11 : carte piézométrique après simulation (2036)

Tableau 6 : Evolution des niveaux piézométriques au niveau des ouvrages situés à proximité des limites

Ouvrages	X	Y	Charge observée (m)	Charge modélisée (m)	2026	2036
PD153	312061	1367640	1,17	1,19	0,79	0,59
PD134	314865	1367214	1,88	1,83	1,59	1,48
PD129	312962	1369046	1,55	1,65	1,49	1,37
PD124	311791	1369289	1,73	2,03	1,53	1,45
PD121	311003	1370476	1,56	1,49	-3,44	-4,64
PD120	310883	1370745	1,94	1,66	-4,00	-5,23
F5 Club Med	310152	1372133	2,47	2,17	-2,02	-3,09
F4 Club Med	309970	1372137	2,36	2,32	-2,07	-3,14
PD82	310328	1369778	1,39	1,41	-0,49	-1,52
PD78	310212	1369942	1,59	1,06	0,06	-0,72
PD75	311224	1369903	1,22	1,53	0,54	0,12
FBAIEB1	308309	1372098	2,02	1,63	0,64	-0,40
PD56	309830	1374129	2,13	1,99	0,44	-0,19
PD53	306704	1374402	2,03	1,58	0,84	0,50
PD49	307776	1376004	0,73	1,17	0,74	0,20
PD39	307522	1379337	1,65	1,89	0,34	0,19
PD38	307615	1379281	1,68	1,93	1,20	0,78
D30	309956	1376325	1,94	1,73	-0,95	-0,78
D23	307239	1377870	1,66	1,85	1,72	1,63
D22	306693	1378063	1,87	1,78	1,33	1,18

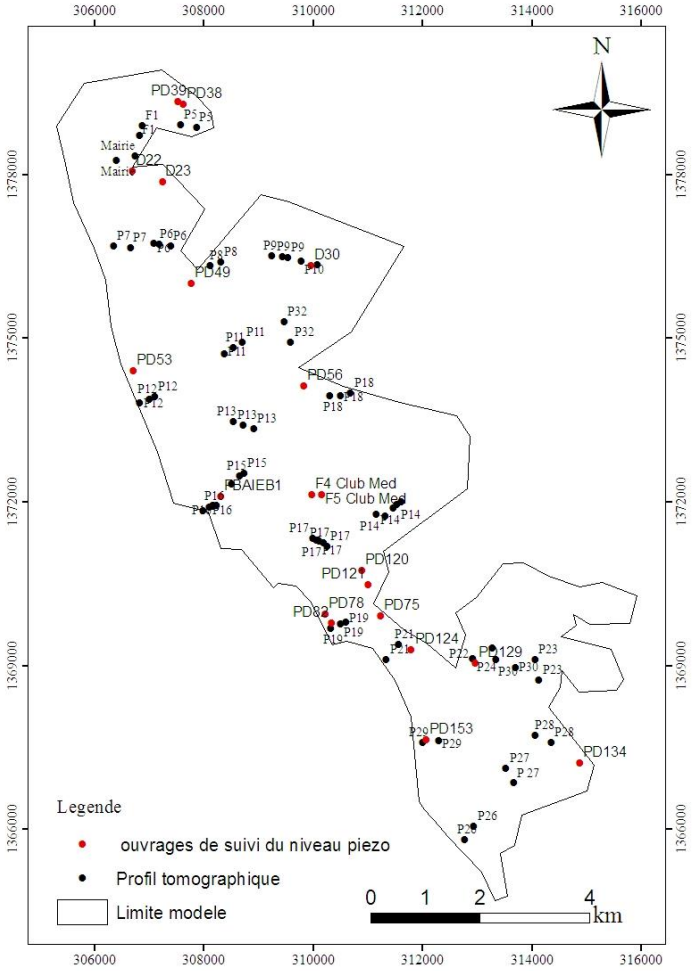


Figure 12 : Répartition des ouvrages situés à proximité des limites

Dans le scénario visant une exploitation rationnelle de la nappe, l'essentiel des pompages a été concentré au niveau des zones de plateau où l'épaisseur de la nappe est maximale (14 forages + 4 forages du champ captant de Boucotte). Les résultats des simulations pour satisfaire les besoins en eau à cours et moyen terme montrent que les pertes d'eau vers les limites ont fortement diminué mais se dirigent toujours principalement vers les «bolongs». Cependant, malgré la mise en place d'un champ captant et l'augmentation des débits pompés au niveau du plateau de Boucot mais également la baisse de la recharge, les venues d'eau en provenance de la mer et des «bolongs» diminuent. Cette diminution est de l'ordre de 0.95 et 73 m^3/j respectivement vers la mer et les «bolongs» entre 2016 et 2036 (Tableaux 7 et 8). Ceci est lié au fait que les zones d'exhaures de la nappe ont été éloignées des limites (les pompages ont été abandonné au niveau des ouvrages situés à proximité de la mer et des «bolongs»). Ces résultats montrent que l'implantation d'un centre captage au niveau du plateau de Boucot permettra de

satisfaire les besoins en eau potable des populations du Cap Erucken. Elles montrent également que l'arrêt des forages à proximité des limites et la concentration des pompages dans les zones de plateaux constituent des critères essentiels pour une exploitation rationnelle de la nappe du CT de la zone de Cap Skiring.

Tableau 7 : Bilan hydrique calculé en m^3/j en 2026

Paramètres	In	Out
Recharge	6 918	0
Pompage	0	1 900
Echange vers la mer	2.35	1 159.71
Echange vers les «bolongs»	150.42	5 090.03
Bilan	7 070.77	8149.74

Tableau 8 : Bilan hydrique calculé en m^3/j en 2036

Paramètres	In	Out
Recharge	6189.66	0
Pompage	0	2 284
Echange vers la mer	1.40	1 041.33
Echange vers les «bolongs»	77.85	3 786.77
Bilan	6 268.91	7 112.1

3.2.3. Choix des sites d'implantation de nouveaux captages

En rapport avec les objectifs de l'étude qui portent sur l'optimisation des potentialités de la nappe pour satisfaire les besoins en eau de la population et du secteur touristique de la zone de Cap Skiring, les investigations géophysiques, hydrogéologiques et hydrochimiques ont révélé des sites où l'épaisseur de la nappe est importante. Un champ de captage comportant 4 forages a été implanté au niveau de l'un de ces sites (plateau de Boucot) afin de satisfaire les besoins en eau des populations du Cap Erucken estimées à 8 712 ; 11 372 et 14 843 habitants respectivement pour les années 2016 ; 2026 et 2036 (Tableau 9 ; Annexe III). Les résultats de la modélisation hydrogéologique ont montré que l'implantation de forages dans la zone d'étude doit tenir compte du caractère côtier de la zone. C'est ainsi que les ouvrages prévisionnels doivent être éloignés de 500 m de la mer et des «bolongs» pour éviter l'avancée de l'intrusion saline à long terme (Figure 13). Ils peuvent être concentrés au niveau des plateaux de Bouyouye, Boucot et Kabrousse.

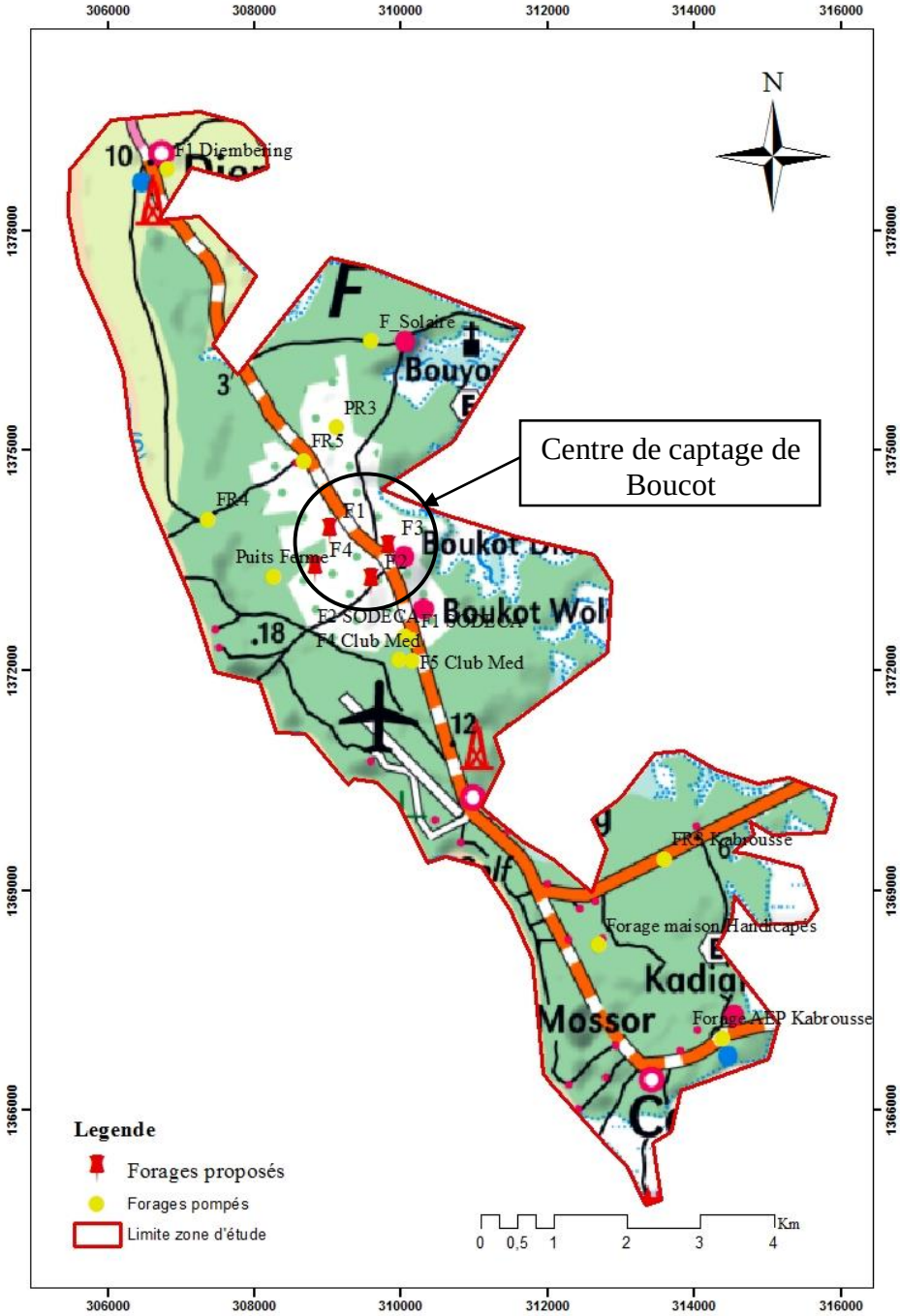


Figure 13 : Zones potentiels d'implantation de forages

Tableau 9 : Localisation des forages du futur champ captant de Boucot

Forages	X_UTM	Y_UTM
F1	309 026	1 373 895
F2	309 595	1 373 201
F3	309 826	1 373 664
F4	308 837	1 373 369

4. CONCLUSION

Cette étude sur la **"l'*Evaluation des Potentialités des ressources en Eau en vue d'Alimenter la Zone de Cap Skiring*",** a surtout permis d'améliorer nos connaissances sur les caractéristiques et le fonctionnement du système et plus particulièrement des relations nappe/mer et nappe/bolongs.

L'analyse des résultats de la campagne hydrogéologique, tomographique et de nivellement topographique mais également les logs des forages profonds ont permis de schématiser et de circonscrire le domaine à modéliser puis d'établir le modèle conceptuel de fonctionnement du système nappe/mer et nappe/bolongs. Les résultats de ce modèle montrent le pompage des ouvrages situés à proximité des limites peuvent occasionner des rabattements importants de l'ordre de -14 m et du coup engendrer des phénomènes d'intrusion saline. Cette nappe du CT de Cap Skiring peut être exploitée de manière rationnelle en limitant les venues et les pertes d'eau aux limites. L'implantation de forages pour satisfaire la demande en eau des populations et du secteur touristique doit se faire au niveau des plateaux de Bouyouye, Boucot et Kabrousse. La modélisation hydrogéologique a également montré que l'implantation d'un champ de captage au niveau du plateau de Boucot peut permettre de satisfaire l'AEP des populations du Cap Erucken.

5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Anderson, M. et Woessner, W. (1992). Applied groundwater modeling and advective transport, *Academic Press*, Inc. London, pp. 234-350.

BRGM, (1988). Etude hydrogéologique complémentaire dans le secteur du Cap Skirring-Zone d'aménagements touristiques de la Basse Casamance- Rapport de synthèse final.

BRGM, (1990). Etude hydrogéologique de la zone du Cap Skirring – Résultats des travaux de reconnaissance réalisés entre mai et décembre 1989 et synthèse des données.

BRGM, (1990). Etude hydrogéologique de la zone du Cap Skirring-Extension Kabrousse-Diembéring-Synthèse des données, modélisation et prévision des ressources exploitables.

BURGEAP, (1988). AEP du village de Cap Skirring (Sénégal) - Etat des forages en septembre 1988 et recommandations pour extension.

Clement, T.P. *(*1997). RT3D - A Modular Computer Code for Simulating Reactive Multi-Species Transport in 3-Dimensional Groundwater Aquifers PNNL-11720 Pacific Northwest National Laboratory, Richland, Washington

Debuisson, J., Gagniere, G. (1969). Campagne de 133 puits 1967/68.Région de Casamance *et du Sénégal-Oriental. B.R.G.M. 69 DAK5.*

Dieng, M. (1965). Contribution à l'étude géologique du Continental termina l au Sénégal. Rapport B.R.G.M. Dakar,T.I , 181p.,T.2, 172 fig. ,4pi. photos.

Domenico and Schwartz. (1998). Physical and Chemical Hydrologeology (2nd ed.): John Wiley and Sons, Inc, New York, 506 p.

Fetter, C.W., (1994). Applied Hydrogeology, 3rd ed.: Macmillan College Publishing, Inc., New York, 616 p.McDonald & Harbaugh, 1988

Gouzes, R. (1961). Etude hydrologique de la Casamance. B.R.G.M.

Pollock DW. (1994). User's guide for MODPATH: a particle tracking post-processing package for MODFLOW, the USGS finite-difference groundwater flow model. US Geological Survey Report.

Senagrosol-Fokus. (2007). Région de Ziguinchor : Plan local d'hydraulique et d'assainissement – PLHA-Communauté rurale de DIEMBERING, Ministère de l'Hydraulique Rurale et du Réseau Hydrographique National, 21 p + annexes.

LE Priol, J. (1983). Synthèse hydrogéologique du bassin sédimentaire casamançais. 3vol. DEH Dakar.

Zheng, Chunmiao, and Wang, P. Patrick, (1999). *MT3DMS,* A modular three-dimensional multi-species transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems; documentation and user¡¯s guide, U.S. Army Engineer Research and Development Center Contract Report SERDP-99-1, Vicksburg, MS, 202 p

Annexes

Annexe I : EVALUATION DES BESOINS EN EAU POTABLE DANS LA ZONE DU PROJET

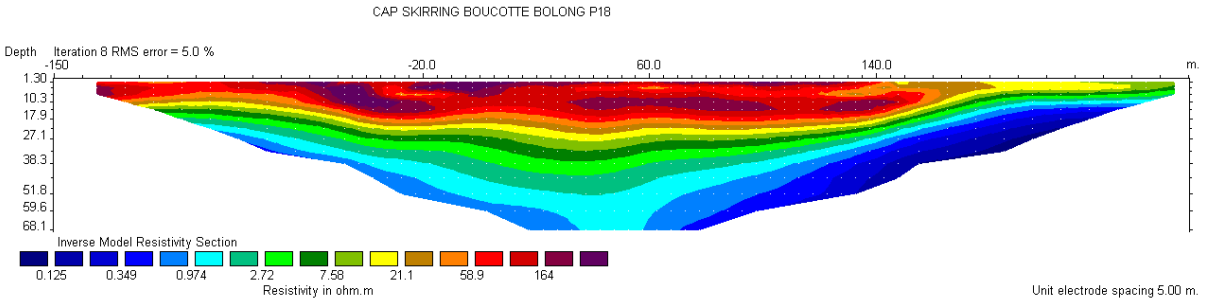
			Population			Besoins journaliers (m3)		
Zone	**Site**	**Dotation (l/j)**	**2016**	**2026**	**2036**	**2016**	**2026**	**2036**
1	Hôtel le Mirage	200	40	40	40	8	8	8
	Cap OUEST	200	12	78	78	2,4	15,6	15,6
	Amigo Bay	200	66	75	75	13,2	15	15
	Baie de Boucotte	200	150	240	240	30	48	48
	Quai de pêche du Cap Skirring					20	20	20
	Cap Océan	200	20	20	20	4	4	4
2								
3	Club Med	800	418	418	418	334,4	334,4	334,4
4	Golf	150				150	150	150
5	Hôtel La Paillotte	400	90	90	90	36	36	36
6	Résidence les Alizés (6)	200	96	96	96	19,2	19,2	19,2
	Résidence le Marsu (6b)	200	86	86	86	17,2	17,2	17,2
	Villa des Pêcheurs (6c)	200	26	26	26	5,2	5,2	5,2
	Campement NO STRESS (6d)	200	20	20	20	4	4	4
	Hôtel La Maison Bleue (6e)	200	36	36	36	7,2	7,2	7,2
	Campement Le Paradise (6f)	200	23	23	23	4,6	4,6	4,6
	Hôtel (6g)	200	40	40	40	8	8	8

7	Campement Mussuwam	200	36	36	36	7,2	7,2	7,2
8	La Palmeraie (8a)	200	60	60	60	12	12	12
	Hibiscus (8b)	200	102	102	102	20,4	20,4	20,4
Villages								
10	Kabrousse Mossor	40	4713,40465	6152,32348	8030,5187	188,536186	246,092939	321,220748
11	Kabrousse Kadiakaye	40						
	Kabrousse Nialou	40						
12	Cap Eruken	40	8712,39307	11372,1321	14843,8423	348,495723	454,885285	593,753693
	Hôtel Balafon	200	46	46	46	9,2	9,2	9,2
	Hôtel CISKO	200	54	54	54	10,8	10,8	10,8
	Hôtel Bolong Passion	200	12	12	12	2,4	2,4	2,4
	Les Palétuviers	200	32	32	32	6,4	6,4	6,4
	Sapeurs Pompiers	50	20	20	20	1	1	1
	Gendarmerie	50	60	60	60	3	3	3
12b	Aéroport + Hôtel + Hôtel Palmier	200	40	40	40	8	8	8
13a	Boucotte Oualof+Boucotte Diola	40	1926,89093	2515,13655	3282,96313	77,0756373	100,605462	131,318525
	Ferme Elevage bovins	40	30	30	30	1,2	1,2	1,2
13b	Résidences Européennes de Boucotte	150	15	30	30	2,25	4,5	4,5
14	Bouyouye	40	458,852702	598,932292	781,775696	18,3541081	23,9572917	31,2710278
	Ferme CPAS de Bouyouye							
Centre agricole ASL	Cultures sous serre							

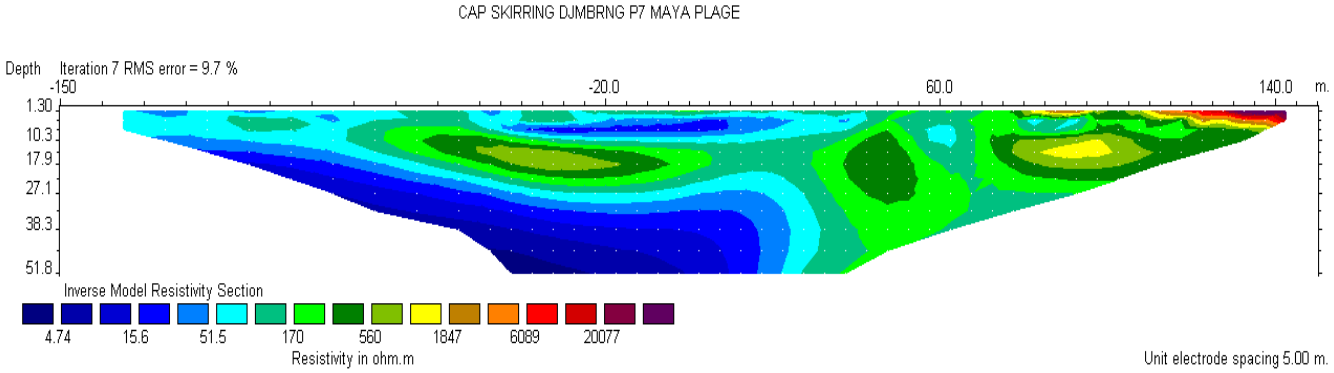
Maya	Hôtel Maya	200	40	120	120	8	24	24
	Campements divers	200	28	56	56	5,6	11,2	11,2
15	Eco Lodge	200	24	24	24	4,8	4,8	4,8
	Campement Akine Djoni Lodge	200	14	14	14	2,8	2,8	2,8
	Campement Casa	200	20	20	20	4	4	4
	Diembéring	40	4213,89411	5500,32124	7179,47174	168,555765	220,012849	287,17887
Total			21781	28183	36163	**1573**	**1875**	**2194**

Annexes II. Quelques profils tomographiques situés à proximité des limites

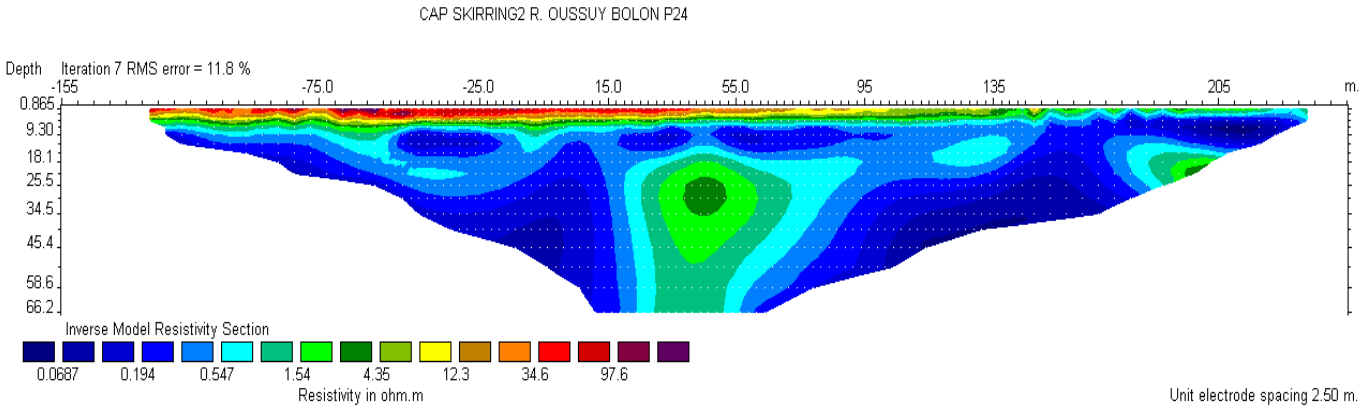
Annexe II.1. Boucotte Bolong P18



Annexe II.2. Djembéring Maya Plage P7



Annexe II.3. Cap Skiring Bolong P24



Annexe III : Répartition des forages par zones (les forages pompés au niveau des scénarii d'exploitation rationnelle de la nappe sont en gras

Zones	**Villages et Hôtels**	**Forages ou Puits**
1	Diembéring	**F1 Diembéring**
	Campement Casa	
	Akine Dyioni Lodge	
2	Campement Eco Lodge	PD 45 ; **F_Solaire ;** **FR4 ;** **FR5 ;** **FR3**
	Bouyouye	
	Hôtel Maya	
	Campement 1 et 2	
3	Club Med	F Petits Jardiniers ; **F2 SODECA** **F1 SODECA** ; Forage Marie Diatta Forage VIDAL ; Forage Cite Baobab F1 Club Med ; F2 Club Med F3bis Club Med ; **F3 Club Med;** **F5 Club Med ;** F4 Club Med FAUTO44 FCAPOUEST FBAIEB1 FBAIEB3 FBAIEB2 **Puits Ferme**
	Cap Skirring	
	Hôtel le Balafon	
	Hôtel le Mirage	
	Hôtel Amigo Bay	
	Résidence Cap Ouest	
	Les Palétuviers	
	Elevages Bovins	
	Boucotte	
	Résidence Baie de Boucotte	
	Cap Océan	
	Hôtel Aéroport	
4	Hôtel Cisco Center	**Forage maison Handicapés** F2 Hôtel le Marsu F1 Hôtel le Marsu F2 Hôtel Alizés F1 Hôtel Alizés Forage de Annie Maguet Forage Hôtel Hibiscus F1 La Palmeraie **F2 La Palmeraie**
	Hôtel la Paillotte	
	Campement Paradise	
	Hôtel la Maison Bleue	
	Hôtel Villa des pêcheurs	
	Hôtel le Marsus	
	Les Alizés	
	Campement Mussuwam	
	Kabrousse	
	Résidence La Palmeraie	

	Résidence Hibiscus	**Forage AEP Kabrousse** **FR3 Kabrousse** Paradise F la paillotte
	Club Golf	
	Hôtel non stress	