

RÉPUBLIQUE DU SENEGAL

Ministère de l'Hydraulique et de l'Assainissement
Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau



Etude d'évaluation des potentialités des ressources en eau du plateau d'Oussouye

RAPPORT R5 : RAPPORT FINAL DE SYNTHESE

Version Novembre 2017

Num. Livrable	AIE 24-DGPR_L2			
	Rédaction	Vérification	Approbation	Version
Visa	Serigne FAYE	Babacar DIENG	Ndongo SENE	Version provisoire
Date	10/11/2017	12/11/2017	12/11/2017	12/11/2017



Patte d'Oie Builders villa n° B11 & D11 jumelées
Tel. 33 855 95 90 / 33 855 95 91 / 33 855 95 93 Fax : 33 855 95 92
Email : idev-ic@idev-ic.sn / agrosol@orange.sn /
Web : www.idev-ic.sn



SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	5
1.1 CONTEXTE DU PROJET	5
1.2 OBJECTIFS DE L'ETUDE	5
1.3 RESULTATS ATTENDUS	6
1.4 APPROCHE ET DEROULEMENT DE L'ETUDE.....	6
2. PRINCIPAUX RESULTATS DE L'ETUDE	8
2.1 PRESENTATION DE LA ZONE DE L'ETUDE.....	8
2.1.1 Configuration géographique et administrative	8
2.1.2 Revue du contexte climatique.....	10
2.1.2.1 Paramètres climatiques.....	10
2.1.2.2 Pluviométrie	11
2.1.2.3 Secheresse et évolution du climat	13
2.2 RESULTATS DES INVESTIGATIONS HYDROLOGIQUES	14
2.2.1 Le système hydrographique du plateau de Oussouye	14
2.2.2 Evaluation des apports d'eau de ruissellement (potentialités en eau de surface)	16
2.3 RESULTATS DES INVESTIGATIONS GEOLOGIQUES ET DES TRAVAUX GÉOPHYSIQUES	20
2.3.1 Contenu des investigations géologiques réalisés.....	20
2.3.2 Contenu des travaux réalisés	20
2.3.3 Résultats des investigations géologiques.....	22
2.3.4 Résultats des travaux géophysiques	24
2.4 RESULTATS DES INVESTIGATIONS HYDROGEOLOGIQUES	26
2.4.1 Paramètres hydrodynamiques.....	26
2.4.2 Etat des prélèvements	26
2.4.3 Données piézométriques	26
2.5 RESULTATS DES INVESTIGATIONS HYDRO-CHIMIQUES	31
2.5.1 Méthodologie et volume des travaux réalisés.....	31
2.5.2 Résultats obtenus	32
2.6 ALIMENTATION DES NAPPES.....	41

2.7 FONCTIONNEMENT DU SYSTEME AQUIFERE ET MODELE CONCEPTUEL44

2.8 CONSTRUCTION ET EXPLOITATION DU MODELE DE SIMULATION45

2.8.1	Logiciel de modélisation	45
2.8.2	Implémentation des données d'entrée.....	46
2.8.2.1	Modèle conceptuel et maillage	46
2.8.2.2	Géométrie de l'aquifère.....	48
2.8.2.3	Prise en compte des prélèvements.....	51
2.8.2.4	Régime hydrodynamique	52
2.8.2.5	Données aux limites.....	52
2.8.2.6	Paramètres hydrauliques	52
2.8.2.6	Données piézométriques	52
2.8.2.6	Données de recharge	52
2.8.3	Calage du modèle (données de calage (piézométriques étiage 2017, perméabilités), résultats obtenus : (piézométrie simulée, écart avec valeurs mesurées, bilan hydrodynamique).....	53
2.8.3.1	Données de calage	53
2.8.3.2	Répartition des perméabilités calées	53
2.8.3.3	Répartition de la recharge.....	54
2.8.4	Résultats du calage	55
2.8.4.1	Piézo-métrie	55
2.8.4.2	Bilan hydrodynamique	56
2.8.5	Exploitation du modèle (scénarios, résultats, recommandation pour la mise en place de nouveau champ de captage)	56
2.8.5.1	Définition des scénarios et localisation des nouveaux ouvrages	56
2.8.5.2	Résultats de la simulation	58
2.8.5.3	Recommandations pour la mise en place de nouveaux champs captant dans l'aquifère Continental Terminal du Plateau d'Oussouye	60

3. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS 61

BIBLIOGRAPHIE..... 62

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

Figure 1 :	Evolution de la pluviométrie à la station d'Oussouye	11
Figure 2 :	Evolution de la pluviométrie au niveau des différentes stations	12
Figure 3 :	Distribution de la pluviométrie dans le département d'Oussouye	12
Figure 4 :	Evénements pluviométriques (secs et humides) à Oussouye	13
Figure 5 :	Bassins versant du plateau d'Oussouye.....	16
Figure 6 :	Carte de sondage électrique et coupe géo-électrique	21
Figure 7:	Coupe géologique Ouest-Est (source « Synthèse hydrogéologique du bassin sédimentaire de la Casamance DEH 1983).....	22
Figure 8 :	Coupe géologique Nord-Sud à partir des données des forages existant	23
Figure 9 :	Carte du mur l'aquifère du Continental Terminal (d'après résultats géophysiques)....	25
Figure 12 :	statistique descriptive des données physico chimiques des 2 campagnes	32
Tableau 1 :	Température mensuelle	11
L'insolation oscille entre 5h/j et 9,8h/j tenant compte des mesures effectuées à la station de Ziguinchor (période 1951 – 1988) (d'après COSVINT, 1990). Les périodes de forte insolation sont notées de Janvier à Mai (Tableau 2)		
Tableau 2 :	Insolation (en h/j)	11
Tableau 3 :	Evolution de l'évaporation et de l'évapotranspiration.....	11
Tableau 4 :	Récapitulatif des événements pluvieux.....	13
Tableau 5 :	Pluviométrie mensuelle.....	13
Tableau 6 :	Caractéristiques des événements de sécheresse	14
Tableau 7 :	paramètres morpho structuraux des bassins versants du plateau de Oussouye	17
Tableau 8:	estimation du débit décennal	18
Tableau 17 :	Termes du bilan hydrodynamique du modèle Visual Modflow calé.	56
Tableau 18:	termes du bilan après simulation	60
Carte 1 :	Délimitation de la zone d'étude	9

1. INTRODUCTION

1.1 Contexte du projet

Le présent rapport est celui de la synthèse de l'ensemble des travaux menés dans le cadre du projet de « l'Etude d'évaluation des potentialités des ressources en eau du plateau d'Oussouye ». Ce rapport est le cinquième livrable de cette mission.

Financé par l'Etat du Sénégal dans le cadre du BCI 2017, ce projet vise la maîtrise et la connaissance des eaux souterraines et de surface pour répondre aux multiples besoins des populations d'Oussouye. Le principal problème pour ce département est d'être la zone la moins nantie en ouvrages hydrauliques adéquats si on le compare avec les départements de Ziguinchor et de Bignona.

Ainsi donc, pour répondre aux multiples besoins des populations concernées la DGPRE s'est attachée des services de IDEV-ic pour l'accompagner dans la présente étude qui vise à améliorer l'adduction d'eau potable et éventuellement assurer les besoins en eau pour l'irrigation et le cheptel dans la zone du plateau d'Oussouye où les ressources en eau souterraine sont très vulnérables du fait du Fleuve Casamance et des marigots (bolongs) qui sont salés.

Le projet s'inscrit dans le cadre de la mise en œuvre du Plan Sénégal Emergent (PSE) qui est le principal référentiel de la politique économique et sociale du Sénégal. En effet, en sus des questions relatives à la croissance économique et à l'amélioration de la gouvernance, l'un des principaux axes de travail du PSE est aussi l'amélioration des conditions de vie des populations et la lutte contre les inégalités sociales. L'accès à l'eau pour l'alimentation en eau potable et la promotion des activités socioéconomiques constituent ainsi un pan majeur de cet axe de travail du PSE. A cet égard, des efforts appréciables ont été consentis par le gouvernement du Sénégal pour faire face à l'aggravement des problèmes hydriques qui se posent au niveau national en général et en zone sud en particulier. Il s'agit de les prolonger par l'amélioration des connaissances et des moyens de gestion des ressources en eau et la création d'un environnement favorable à l'application d'une approche de Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) qui sont essentielles pour la réussite d'une politique durable d'accès à l'eau.

1.2 Objectifs de l'étude

L'objectif principal de cette étude est d'approfondir les connaissances sur les potentialités hydrogéologiques et hydrologiques de la zone Oussouye pour l'alimentation des populations en eau potable et le renforcement des capacités de la DGPRE en planification et gestion des ressources en eau, pour : mieux répondre aux besoins en eau des populations locales et ; envisager des possibilités de transfert d'eau vers les zones voisines dont les ressources en eau sont menacées par l'invasion saline

De manière plus spécifique, il s'agira :

- de faire l'inventaire des points d'eau,
- d'identifier le potentiel hydrogéologique des nappes du Continental Terminal (CT) et de l'Oligo-Miocène (OM) en vue de l'AEP de la zone d'Oussouye,
- de caractériser les différents cours d'eau dans la zone,
- d'évaluer le potentiel de ressources en eau mobilisables en vue d'une couverture durable de l'approvisionnement en eau des populations,
- d'analyser l'exploitabilité des ressources en eau souterraines en vue de conclure sur la faisabilité des infrastructures hydrauliques permettant un accès durable à l'eau potable de la zone de l'étude et en prenant en compte les possibilités de transfert vers les zones voisines à ressources en eau de moins bonne qualité,
- d'améliorer les outils de gestion de la DGPRE en tenant compte des spécificités de la zone.

1.3 Résultats attendus

Il est attendu de l'étude les résultats suivants :

- la base de données de la DGPRES actualisée ;
- une synthèse des études hydrogéologiques et hydrologiques antérieures de la zone élaborée ;
- les besoins en eau potable des populations de la zone de l'étude estimés ;
- les ressources en eau souterraine identifiées et caractérisées aux plans quantitatif et qualitatif avec :
 - o des informations sur l'exploitation du C.T et de L'O.M (débits et temps de pompage, etc.) recueillies,
 - o les mécanismes, les zones de recharge et le taux de la recharge des nappes dans cette zone mieux connus,
 - o des données sur les fluctuations du niveau des nappes disponibles,
 - o la qualité des eaux souterraines de la zone d'étude mieux connue (paramètres physico-chimiques, salinité, etc.),
 - o les résultats d'analyse des relations eaux salées/eaux douces, ressortis
 - o des recommandations précises concernant les implantations des ouvrages de captages (A.E.P et suivi de la ressource), élaborées ;
 - o un modèle simplifié ainsi que des outils prenant en compte les spécificités de la région et permettant une gestion prévisionnelle des ressources en eau, défini ;
 - o l'Etat des lieux des ouvrages de captage en général, les forages privés en particulier, dans la zone d'étude réalisés;
 - o des propositions de solutions de transfert d'eau pour l'alimentation en eau des zones voisines ne disposant pas de ressources en eau de bonne qualité (îles de la Casamance en particulier) , établies;
 - o une meilleure planification des ouvrages à réaliser, établie

1.4 Approche et déroulement de l'étude

Le déroulement de l'étude s'est fait en trois principales phases qui ont abouti chacune à la production d'un rapport. Ces trois phases ont précédé d'une phase préparatoire soldée par le rapport d'Orientation Méthodologique (ROM). Les trois phases principales sont :

- La phase 1 : avec la production du rapport sur la géométrie du système aquifère :

La démarche méthodologique utilisée pour conduire cette étape de la mission s'est appuyée sur trois principales actions qui sont :

- **La recherche documentaire** : en effet la zone de l'étude a fait l'objet dans le passé d'études hydrogéologiques et géophysiques et campagnes de travaux de réalisation de forages hydrauliques et sondages profonds. Nous avons essayé de retrouver et d'exploiter les rapports de ces différentes études au bénéfice de cette mission. L'ensemble des rapports et documents exploités est fourni dans partie bibliographie du présent rapport.
- La réalisation de travaux de terrain portant sur :
 - o **Un inventaire des ouvrages** hydrauliques existants dans la zone de l'étude qui comprennent tous les forages hydrauliques et piézomètres, un échantillon de puits pris en prenant en compte tous les villages, les mares. Ces travaux d'inventaire ont fait l'objet d'un rapport spécifique qui est annexé au présent rapport ;
 - o **Des travaux de prospection géophysiques** qui ont fait l'objet d'un rapport spécifique qui est annexé au présent rapport ;
 - o **Des travaux de nivellement** des puits, forages et points retenus pour les sondages électriques qui ont permis d'avoir des coordonnées géographiques qui seront utilisés pour la production des supports cartographiques et la réalisation d'un système d'information géographique).
- La phase 2 : avec la production du rapport sur la synthèse des données hydrologiques, hydrogéologiques et hydro-chimiques :

Pour mener à bien cette phase de l'étude, la méthodologie utilisée a consisté à réaliser pour les principaux thèmes (hydrologie, hydrogéologie et hydrochimie) des études documentaires complétées en cas de besoin par des investigations de terrain.

La méthodologie d'investigation utilisée pour cette étape de la mission s'appuie sur la méthodologie générale de l'étude. Elle a précisément porté sur :

- la synthèse des investigations hydrologiques, hydrogéologiques et hydro chimiques des nappes et cours d'eau du plateau de Oussouye ;
- l'étude du fonctionnement hydraulique (direction et paramètres des écoulements, conditions et évaluation de l'alimentation des nappes par les pluies et les cours d'eau de surface, relation hydraulique entre les nappes et les cours d'eau de surface et la mer).

La synthèse et l'analyse de l'ensemble des données et informations recueillies à travers la recherche documentaire et les travaux de prospection géophysiques ont été faites en utilisant entre autre des outils informatiques appropriés (SIG en particulier).

- La phase 3 : avec la production du rapport de modélisation :

Elle a consisté à partir de l'ensemble des données fournies par les deux premières étapes à :

- faire un choix du système aquifère à modéliser en prenant en compte les objectifs de l'étude ;
- à choisir un outil de modélisation en concertation avec la DGPRE pour faciliter au mieux l'utilisation ultérieure de cet outil par les agents de la DGPRE ;
- à construire et caler le modèle correspondant avec les données issues des deux premières phases de l'étude ;
- à utiliser le modèle pour identifier les conditions d'exploitations correspondant à des scénarios d'utilisation de la ressource en eau en concertation avec la DGPRE.

La phase actuelle de l'étude est la synthèse de l'ensemble des phases précédentes ; elle fait l'objet du présent rapport.

2. PRINCIPAUX RÉSULTATS DE L'ÉTUDE

2.1 Présentation de la zone de l'étude

2.1.1 Configuration géographique et administrative

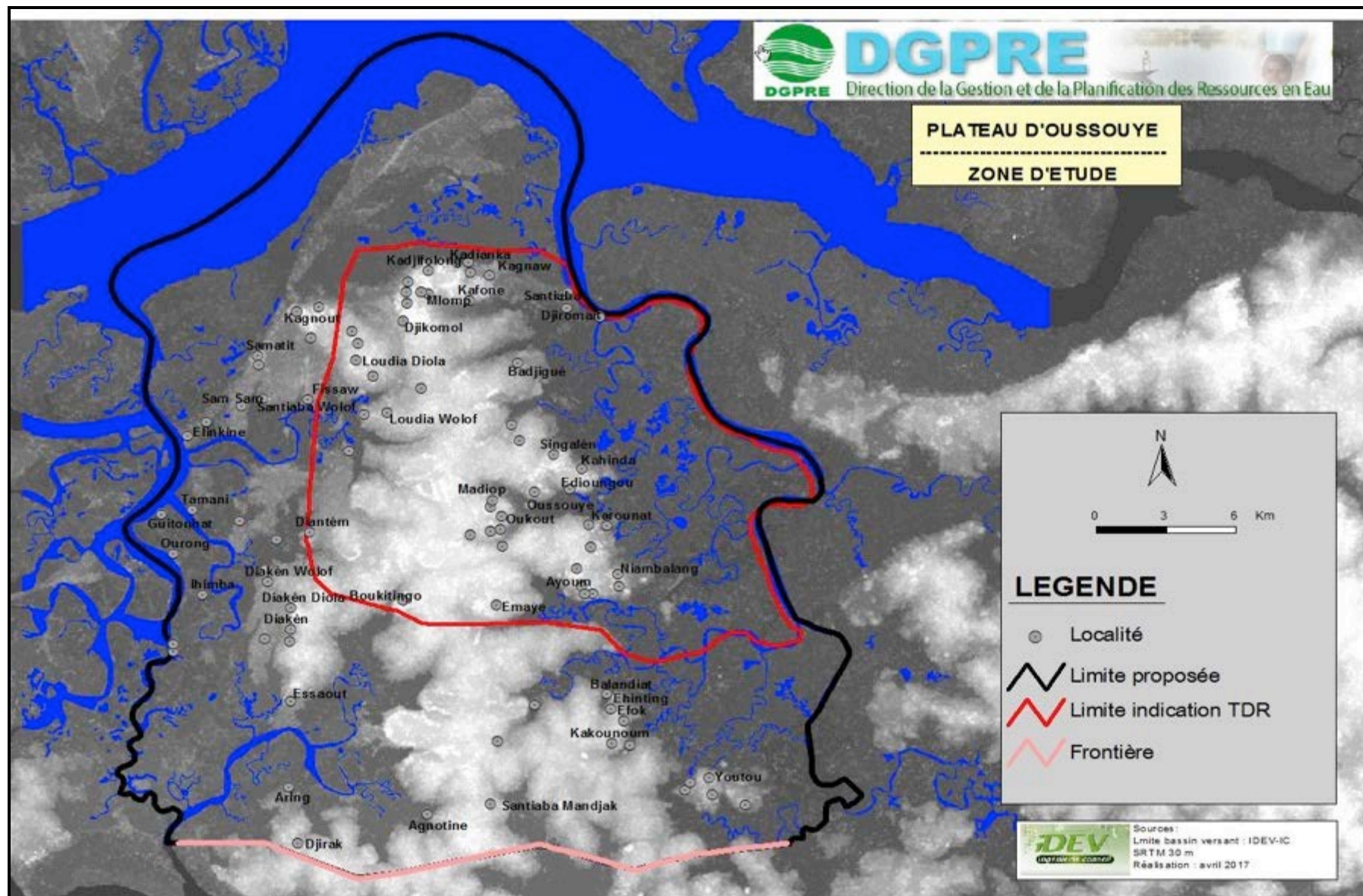
La zone de l'étude concerne le plateau d'Oussouye dont l'étendue telle que d'écrite dans les TDR est limitée :

- Au nord par la latitude du village de Mlomp,
- Au sud par la latitude du village de Siganar,
- A l'ouest par la longitude du village de Loudia Ouolof,
- A l'est par les mangroves et les bolongs.

Suite aux réunions internes de recadrage et pour les besoins du modèle surtout par rapport aux limites hydrogéologiques naturelles, le Consultant s'est proposé d'aller plus loin en délimitant la zone sur la base des bassins versants mais aussi en tenant compte des limites hydrologiques naturelles à savoir :

- Au nord, la bordure du fleuve Casamance ;
- A l'est, le cours d'eau Kamobeul ;
- Au sud, la frontière avec la Guinée Bissau ;
- A l'ouest, le cours d'eau Ourong Bolong et sa jonction avec la Casamance.

La figure 1 ci-après montre la délimitation de la zone du projet retenue et celle proposée dans les TDR.



Carte 1 : Délimitation de la zone d'étude

Le plateau d'Oussouye a une forme étirée de direction Nord-Sud. Son profil, sans doute conditionné par les cours d'eau qui l'entourent : le fleuve Casamance au Nord, les bolong de Kachouane, de Diakène et de Essoukoudiak respectivement au Nord-Ouest et Sud-Ouest et celui de Kamobeul à l'Est. Ce dessin du système hydrographique n'offre au plateau d'Oussouye qu'une seule ouverture vers le Sud ce qui justifie son prolongement jusqu'en territoire Bissau Guinéenne.

Administrativement, la partie nord du plateau d'Oussouye se situe dans la commune de Mlomp où on enregistre environ 25% du territoire du plateau. La commune d'Oukout qui correspond à la partie centrale du plateau occupe un plus de 50% de sa superficie. Au sud, nous avons la commune de Santhiaba Manjack dans laquelle se draine environ 25% territoire du plateau d'Oussouye.

La pédologie du plateau d'Oussouye est construite à travers les différents épisodes morpho-climatiques ayant prévalu dans l'estuaire de la Casamance. La formation des sols a suivi les vagues successives de transgression et de régression marines et de périodes humides ou sèches permettant le dépôt de sédiments divers. Ainsi la Basse Casamance présente une faible diversité de types de sols. Sur le plateau d'Oussouye, nous rencontrons trois principales unités :

- les sols ferrallitiques rouges du continental terminal avec un taux d'argile compris entre 15 et 25%. Leur structure et leur perméabilité sont bonnes, mais ils ont une susceptibilité à l'érosion sous l'effet du ruissellement ;
- les sols hydromorphes dont la caractéristique majeure est l'engorgement rapide en eau pendant la saison des pluies. Ils prédominent dans les bas-fonds bordant le plateau d'Oussouye. Sur les pentes de versants, ils deviennent des sols beiges plutôt sableux ;
- Les sols halomorphes qui présentent des teneurs en sel soluble très variables. Il s'agit principalement des sols de mangrove et des tannes souvent nues et impropres à la culture.

2.1.2 Revue du contexte climatique

2.1.2.1 Paramètres climatiques

Le climat à Oussouye comme dans la région casamançaise est de type soudano-guinéen c'est-à-dire chaud avec une température moyenne humide de 27°. Le climat présente un cycle saisonnier avec une saison pluvieuse de 5 à 6 mois de Mai à Octobre et une saison sèche de Novembre à Avril/Mai. L'essentiel de la pluviométrie est enregistré toutefois entre Juillet et Septembre.

La zone est soumise à trois types de vents :

- l'alizé maritime, relativement frais, de direction NNW; son pouvoir hygrométrique est très faible;
- l'alizé continental ou harmattan, vent chaud et sec qui souffle en saison sèche; son pouvoir hygrométrique est quasi nul;
- la mousson qui après avoir effectué un long parcours océanique, arrive sur le continent avec une humidité élevée de l'air qui apporte la pluie.

Les températures moyennes annuelles sont de l'ordre de 27°C avec un maxima de 33,5°C et un minima de 20,2°C. De Novembre à Avril, les vents dominants sont de secteur Nord à Nord- Ouest (Alizé maritimes).

Les données de température indiquées ci-dessous (en °c) sont issues des températures mesurées à la station de Ziguinchor sur la période 1951 – 1988 (d'après COSVINT, 1990). La saison des pluies est la période où on a des écarts les moins importants (moins de 10°); le reste de l'année, les températures oscillent entre 37° et 15° donnant des écarts pouvant atteindre 19° dans un même mois Tableau 1

Tableau 1 : Température mensuelle

Type	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
Moyenne	24,3	26,0	27,4	28,1	28,5	28,4	27,3	26,8	27,1	27,7	27,0	24,4	26,9
Maximum	32,9	35,2	36,9	37,0	35,7	33,6	31,5	30,5	31,3	32,7	33,3	32,0	33,5
Minimum	15,7	16,7	17,9	19,1	21,2	23,2	23,1	23,0	22,9	22,8	20,6	16,7	20,2
Ecart	17,2	18,5	19,0	17,9	14,5	10,4	8,4	7,5	8,4	9,9	12,7	15,3	13,3

L'insolation oscille entre 5h/j et 9,8h/j tenant compte des mesures effectuées à la station de Ziguinchor (période 1951 – 1988) (d'après COSVINT, 1990). Les périodes de forte insolation sont notées de Janvier à Mai (Tableau 2)

Tableau 3 : Insolation (en h/j)

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Année
8.1	8.7	9.5	9.8	9.4	7.2	5.7	5	5.8	7.4	8.4	7.5	7.7

Albergel, dans climat tranché¹ reprend l'évolution de l'évaporation et de l'évapotranspiration au niveau de Ziguinchor durant l'année Tableau 3

Tableau 4 : Evolution de l'évaporation et de l'évapotranspiration

	Jan	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	An
Evaporation	233	246	285	279	272	226	194	174	177	196	198	208	2687
Evapotranspiration	123	135	182	183	179	145	123	110	115	128	125	111	1659

2.1.2.2 Pluviométrie

- Pluie annuelle

La figure suivante donne une idée sur les données annuelles de pluviométrie de 1933 à 2016 pour la station pluviométrique d'Oussouye .

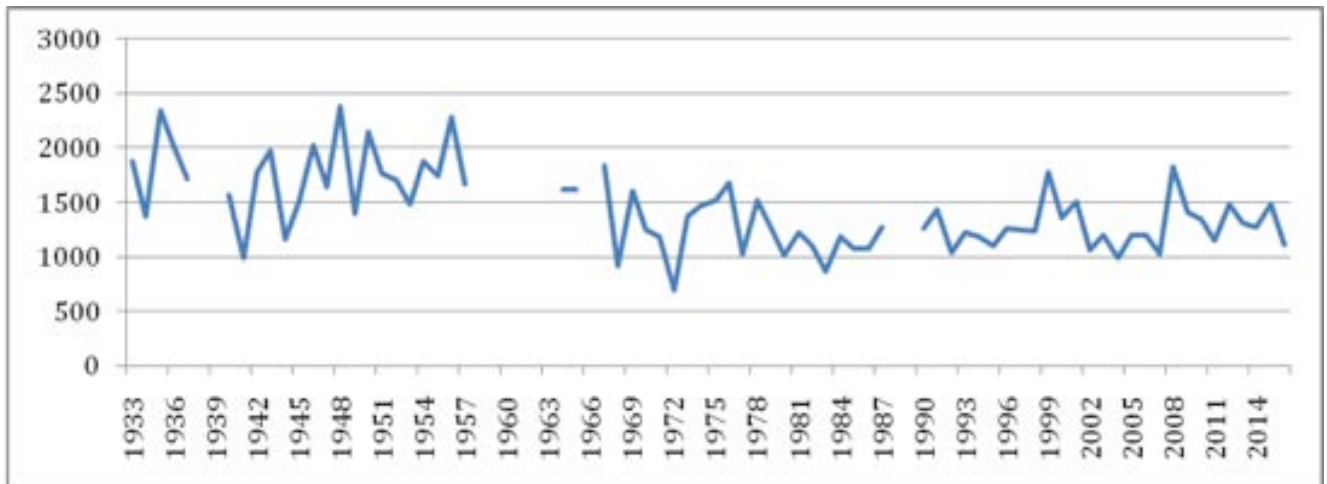


Figure 1 : Evolution de la pluviométrie à la station d'Oussouye

Elle montre une certaine régression de la pluviométrie dans les années 1960. Si la pluviométrie annuelle pouvait atteindre et dépasser les 2000 mm, elle dépasse rarement 1500 mm à partir des années 1960. Ces mêmes tendances sont à noter dans toute la zone.

¹http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers07/38133.pdf

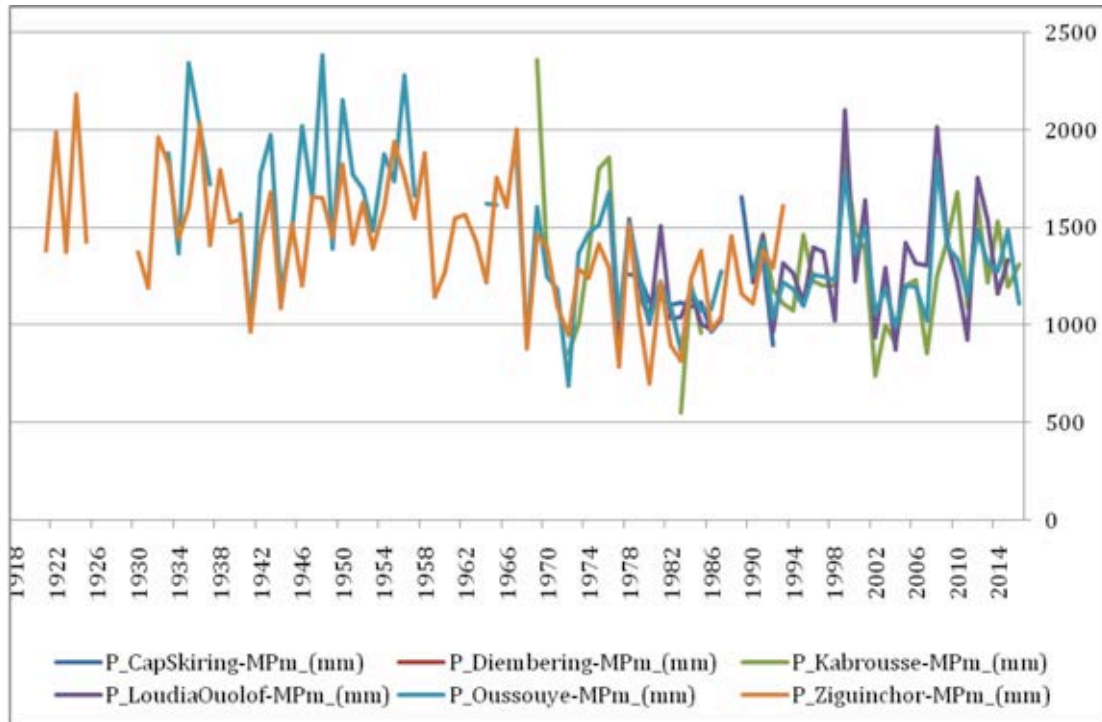


Figure 2 : Evolution de la pluviométrie au niveau des différentes stations

Malgré la détérioration de la pluviométrie relevée, certaines piques sont à souligner pour certaines années. C'est à cet effet que des écarts importants sont à relever avec des maxima pouvant dépasser les 2000 mm pour les stations de Kabrousse, de Loudia Ouolof, de Oussouye et de Ziguinchor et les 1500 mm pour Cap Skiring et Diembering là où les minima varient entre 550mm et 899 mm.

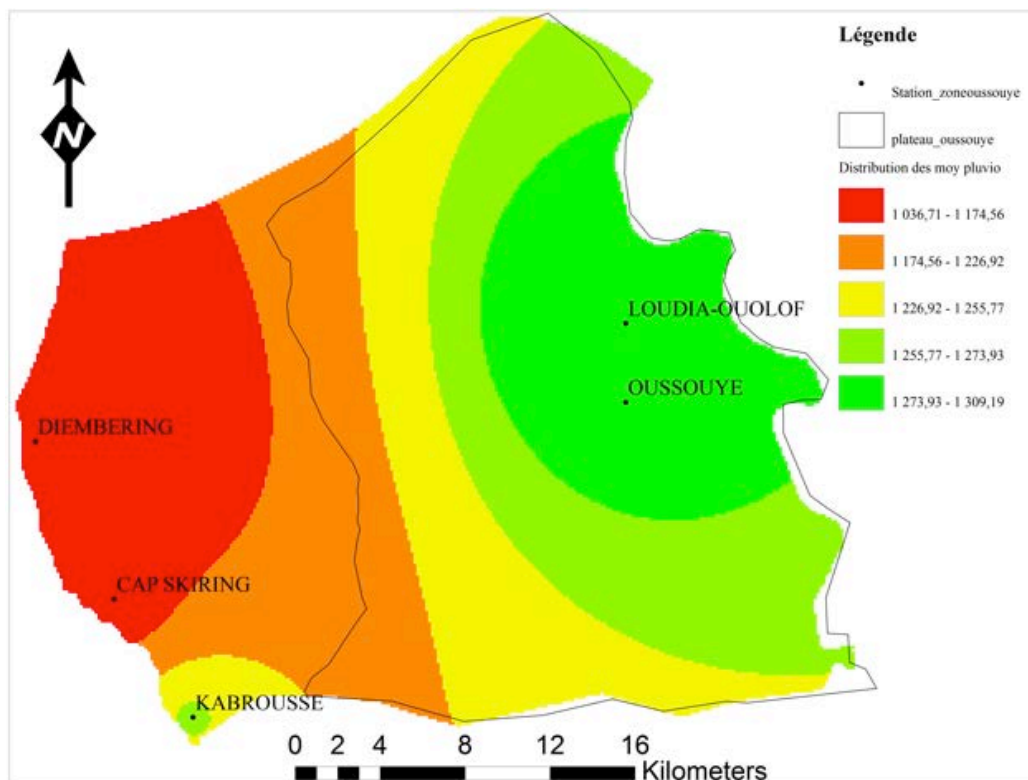


Figure 3 : Distribution de la pluviométrie dans le département d'Oussouye

Tableau 5 : Récapitulatif des événements pluvieux

	Cap Skiring	Diembering-	Kabrousse	LoudiaOuolof	Oussouye	Ziguinchor
Moyenne de la série	1166,85	1098,83	1265,25	1283,58	1431,66	1394,66
Max	1657	1557,2	2359,6	2099,1	2385,9	2031,3
Min	899,9	702,6	550,3	872,1	691,8	699,4
Moy 30 dernières années	1188,53	1036,7	1267,59	1309,20	1277,01	1255,06

Les moyennes des trente dernières années confirment la régression de la pluviométrie au niveau des stations de Ziguinchor et d'Oussouye .

- Pluie mensuelle

L'analyse des pluies mensuelles, montre une concentration de la pluviométrie lors des mois d'Août, de Septembre et d'Octobre avec des jours de pluie plus conséquents par rapport aux autres mois .

Tableau 6 : Pluviométrie mensuelle

	MAI	JUIN	JUILLET	AOÛT	SEPTEMBRE	OCTOBRE	NOVEMBRE	DECEMBRE	Cumul annuel
H (mm) 2015		0	25,7	338,5	545,4	289,7	290,9	109,5	1599,7
H (mm) 2016		30,5	40,8	282,5	235,5	505,3	27,5	0	1122,1
NJ 2015		0	6	19	22	19	15	6	87
NJ 2016		1	3	14	15	22	8	0	63

Un ajustement selon la loi Pearson3T donne la récurrence des événements annuels, biannuels, quinquennaux, décennaux et centennaux.

2.1.2.3 Secheresse et évolution du climat

L'analyse des événements pluviométriques à Oussouye de 1932 à 1987 montre 12 événements de sécheresse à Oussouye.

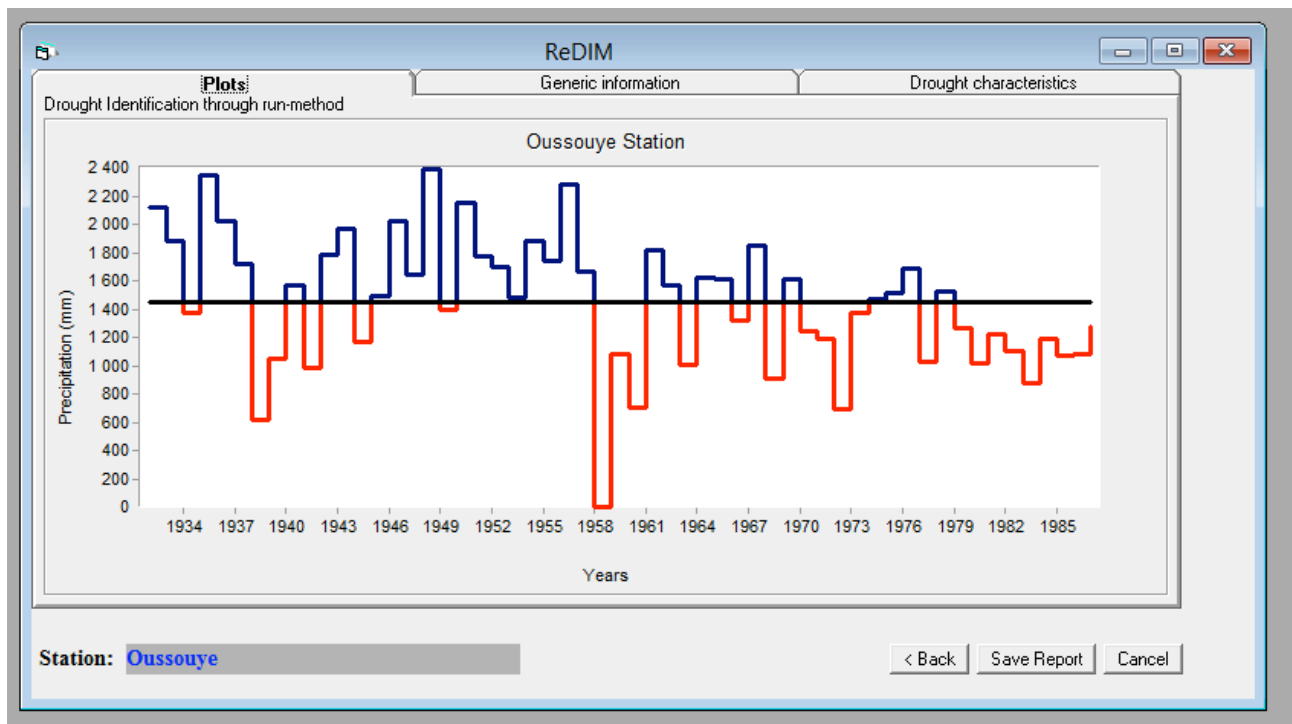


Figure 4 : Événements pluviométriques (secs et humides) à Oussouye

Le plus long et celui de 1979 à 1987 (9ans) avec une intensité de 327,18mm/an et un déficit cumulé de 2944,63mm. En termes d'intensité, la sécheresse de 1958 à 1960 est la plus sévère

avec 856,63mm/an. Mais à considérer le déficit cumulé, celle de 1958 à 1960 est la plus sévère avec 2569,88mm pour 3ans.

Tableau 7 : Caractéristiques des événements de sécheresse

N	Begin.	End	Durat. [years]	Cum. Def. [mm]	Drought Int. [mm/year]
1	1934	1934	1	78,63	78,63
2	1938	1939	2	1238,25	619,13
3	1941	1941	1	461,63	461,63
4	1944	1944	1	285,63	285,63
5	1949	1949	1	55,63	55,63
6	1958	1960	3	2569,88	856,63
7	1963	1963	1	438,63	438,63
8	1966	1966	1	134,63	134,63
9	1968	1968	1	536,63	536,63
10	1970	1973	4	1298,50	324,63
11	1977	1977	1	418,63	418,63
12	1979	1987	9	2944,63	327,18

2.2 Résultats des investigations hydrologiques

2.2.1 Le système hydrographique du plateau de Oussouye

Le plateau d'Oussouye fait partie de l'estuaire gauche du fleuve Casamance qui est complètement occupée par des eaux marines. Ainsi, le système hydrologique du plateau d'Oussouye se caractérise par un tracé très sinueux et des caractéristiques hydrologiques très influencées par l'intrusion des eaux marines.

La carte des altitudes du plateau d'Oussouye montre que la zone la plus haute est rétrécie et s'étire de Mlomp au Nord à Santhiaba Manjack au Sud. Elle correspond par ailleurs à la ligne de partage des eaux donnant naissance à deux grands versants, l'un à l'Est sur lequel on retrouve entre autres les vallées de Youtou, de Effoc, de Siganar, d'Ediougou, de Sengalène de Mlomp.. et l'autre à l'Ouest où nous retrouvons les vallées de Effisao, de Loudia Woloff, de Diantène, de Diakène, de Essaoute, de Kahème ... Il est globalement composé d'une partie du fleuve Casamance, des bolongs et d'une trentaine de vallées aménagées ou non.

- Le fleuve Casamance

Le réseau hydrographique d'Oussouye fait partie du bassin du fleuve Casamance qui prend sa source dans la zone de Vélingara à 50 m d'altitude. Il est drainé sur une longueur de près de 300km, entièrement situé en territoire sénégalais.

Il est le cours d'eau principal et le plus important de la zone. Il prend sa source dans les environs de Fafakourouet parcourt près de 300 km pour se jeter en mer en disséquant de nombreux plateaux du continental terminal. Son bassin versant couvre une superficie de 300 000 ha. Il est à l'origine de la définition des trois compartiments de la région naturelle de Casamance : la Haute Casamance, la Moyenne et la Basse Casamance à laquelle appartient le plateau d'Oussouye.

- Les « bolongs » :

Le plateau d'Oussouye pris dans sa globalité dispose d'un réseau de cours d'eau permanents très fournis. Il est constitué des bolongs qui se rattachent au fleuve Casamance. Il s'agit principalement de :

o Le bolong de Kamobeul à l'Est

Il est le seul grand affluent du fleuve Casamance sur sa rive gauche. Il couvre l'ensemble de la partie Est du département d'Oussouye. Il suit un parcours sinueux formant des boucles à certains

endroits. Le marigot de Kamobeul arrose une bonne partie du département d'Oussouye avec ses nombreux embranchements. Les principales ramifications du marigot de Kamobeul sont : le bolong de Djiramaït et celui de Youtou sur sa rive gauche.

- Le bolong de Kachouane au nord Ouest

Le marigot de Kachouane et celui d'Elinkine constituent deux affluents situés au niveau de l'embouchure du fleuve Casamance. Ils forment l'île de Carabane avant de se rencontrer au sud pour constituer un cours unique, qui prend ensuite le nom de Diakène. Le bolong de Diakène se prolonge vers le sud donnant naissance à plusieurs petits marigots entrelacés.

- Le Bolong d'Essoukoudiak au Sud Ouest

Le bolong d'Essoukoudiak dont l'embouchure se trouve en territoire Bissau guinéen, pénètre la partie sud du plateau d'Oussouye. Il arrose la partie sud Ouest du plateau notamment la commune de Santhiaba Manjack. Des villages comme Essaout, Djirack, Ering sont parcourus par de petits affluents du Bolong d'Essoukoudiak

Il existe par ailleurs plusieurs autres marigots secondaires et des bolongs de moindre envergure qui incisent les plateaux et forment un réseau anastomosé, créant parfois des îles ou des îlots. Ces chenaux constituent la marque profonde du caractère amphibie de la zone. L'importance des précipitations est le principal catalyseur de l'adoucissement des eaux fluviales pendant une bonne période de l'année, surtout dans la partie amont des cours d'eau. Les eaux deviennent aussitôt salées quand la saison sèche s'accroît. La salinité des eaux est un phénomène récurrent en Basse Casamance depuis l'amorce des périodes de sécheresse. La fréquence des années déficitaires provoque parfois une forte augmentation du taux de salinité de certains marigots.

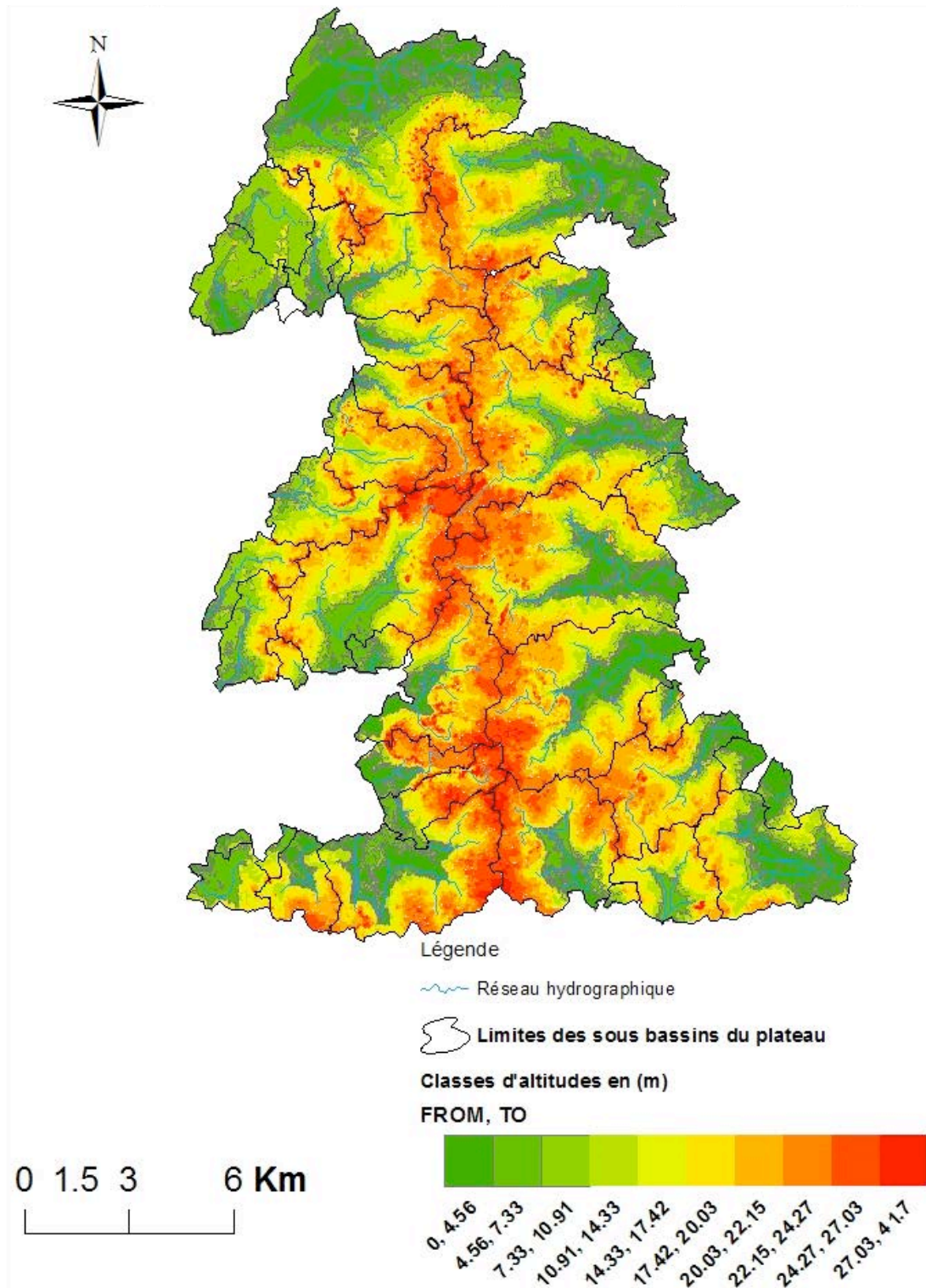


Figure 5 : Bassins versant du plateau d'Oussouye

2.2.2 Evaluation des apports d'eau de ruissellement (potentialités en eau de surface)

Le plateau d'Oussouye est drainé par un réseau hydrographique très dense. Les bassins versant ont une superficie de 0.5 km² à plus de 27 km² (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Ces bassins sont de taille modeste et de longueur moyenne car s'écoulant dans le sens de la pente du talus vers les Bolong. De fait les pentes sont assez marquées et favorise l'écoulement.

Tableau 8 : paramètres morpho structuraux des bassins versants du plateau de Oussouye

Nom Bv	Surface BV (km ²)	PER, BV (km)	Kc	Longueur BV (km)	Largeur BV (km)	Vérification Surface	Dénivelée (m)	Ig (m/km)	Déniv Spécifique	Ip Roche
1. BV Nord-Ouest Loudia Ouolof	0.5	4.3	1.66	1.9	0.3	0.5	20.39	10.8	7.9	3.7
2. BV Loudia Diola	3.4	12.0	1.83	5.4	0.6	3.4	18.77	3.5	6.4	2.1
3. BV Loudia Ouolof n°1	9.0	17.9	1.66	7.8	1.2	9.0	20.85	2.7	8.1	1.8
4. BV Loudia Ouolof n°2	5.7	13.3	1.56	5.6	1.0	5.7	15.64	2.8	6.6	1.9
5. BV Est Diantène	6.2	13.7	1.54	5.8	1.1	6.2	39.12	6.8	16.9	2.9
6. BV de la Forêt de Oukout	7.1	17.6	1.85	7.9	0.9	7.1	18.07	2.3	6.1	1.7
7. BV Djicomot Djiramatte	21.1	28.4	1.73	12.5	1.7	21.1	29.11	2.3	10.7	1.7
8. BV Etebemaye Haer	27.6	32.6	1.74	14.4	1.9	27.6	18.64	1.3	6.8	1.3
9. BV Kagnout	5.2	12.0	1.48	5.0	1.0	5.2	12.94	2.6	5.9	1.8
10. BV Santhiaba Ouolof	5.2	11.2	1.37	4.4	1.2	5.2	7.76	1.8	4.0	1.5
11. BV Forêt classée de Kaem	7.6	14.2	1.44	5.8	1.3	7.6	22.58	3.9	10.7	2.2
12. BV Périphérie de la ville Oussouye	2.0	9.1	1.79	4.0	0.5	2.0	21.17	5.3	7.5	2.6
13. BV Périphérie de la ville Oussouye n°2	0.9	5.2	1.57	2.2	0.4	0.9	19.52	8.8	8.2	3.3
14. BV Périphérie de la ville Oussouye n°3	1.3	5.3	1.27	1.9	0.7	1.3	19.05	9.8	11.3	3.5
15. BV de la ville Oussouye	20.1	30.0	1.88	13.5	1.5	20.1	21.80	1.6	7.2	1.4
16. BV Sigamar	4.9	10.8	1.36	4.2	1.2	4.9	22.8	5.4	12.0	2.6
17. BV Emaye	21.1	26.0	1.58	11.1	1.9	21.1	25.48	2.3	10.5	1.7
18. BV Emaye n°2	19.0	25.4	1.63	10.9	1.7	19.0	25.96	2.4	10.3	1.7
19. BV Emaye n°3	1.9	6.5	1.33	2.5	0.7	1.9	21.75	8.6	11.8	3.3
20. BV Emaye n°4	9.8	19.6	1.75	8.7	1.1	9.8	19.62	2.3	7.1	1.7
21. BV Emaye n°5	1.4	5.2	1.24	1.9	0.7	1.4	18.3	9.8	11.6	3.5
22. BV Emaye n°6	1.6	6.4	1.42	2.6	0.6	1.6	14.25	5.5	7.0	2.6
23. BV Près de Bugim	11.3	17.7	1.47	7.3	1.6	11.3	22.11	3.0	10.2	1.9
24. BV Près de Bugim n°2	0.5	3.2	1.29	1.2	0.4	0.5	14.23	11.9	8.3	3.9
25. BV Près de Doudame	5.5	12.3	1.46	5.1	1.1	5.5	19.09	3.8	8.9	2.2
26. BV Santhiaba Mandjak	11.2	17.2	1.44	7.0	1.6	11.2	25.67	3.7	12.3	2.1
27. BV Près de Sucujaque	3.1	9.7	1.54	4.1	0.8	3.1	16.46	4.0	7.1	2.2
28. BV Bolong Essaout	0.5	3.4	1.40	1.3	0.3	0.5	8.16	6.0	4.1	2.7
29. BV Bolong Essaout n°2	0.7	4.9	1.67	2.1	0.3	0.7	17.37	8.2	6.7	3.2
30. BV Bolong Essaout n°3	3.9	10.3	1.46	4.2	0.9	3.9	22.38	5.3	10.5	2.6
31. BV Camino de Ziguinchor	14.2	21.0	1.56	8.9	1.6	14.2	28.23	3.2	11.9	2.0
32. BV Parc National de la Basse Casamance	4.3	12.7	1.72	5.6	0.8	4.3	23.81	4.3	8.8	2.3
33. BV Parc National de la Basse Casamance n°2	3.5	10.9	1.63	4.7	0.7	3.5	23.72	5.0	9.5	2.5
34. BV Boukitimgo-Emaye	10.9	20.7	1.76	9.2	1.2	10.9	28.46	3.1	10.2	2.0
35. BV Sud Boukitimgo	1.7	6.6	1.41	2.6	0.6	1.7	21.28	8.1	10.5	3.2
36. BV Boukitimgo	16.1	26.0	1.81	11.6	1.4	16.1	29.48	2.5	10.2	1.8
37. BV Nord-Est Essaout	0.9	5.0	1.43	2.0	0.5	0.9	14.5	7.2	7.0	3.0
38. BV Bolong des Crocodiles	3.4	11.9	1.80	5.3	0.6	3.4	17.29	3.3	6.0	2.0
39. BV Nord Essaout	4.5	11.4	1.51	4.8	0.9	4.5	18.77	3.9	8.3	2.2
40. BV Diantène	6.3	15.1	1.68	6.6	1.0	6.3	16.19	2.5	6.2	1.8

L'estimation des écoulements s'est faite en tenant compte des données de la station de Ziguinchor. Les bassins hydrographiques produisent un débit assez intéressant variant de +1m³/s à + 8 m³/s (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Le plateau peut être considéré comme le château d'eau du département de Oussouye tant le volume d'eau ruisselé est important.

Il faut noter qu'au niveau de l'écoulement la circulation de l'eau dans les vallées est perturbée (ralentissement, stockage, ...) du fait de l'occupation d'une bonne partie des vallées par les rizières. Ces aménagements devraient contribuer à une infiltration ou évaporation assez fortes.

Le débit à l'exutoire des différents bassins versants devrait être pondéré par ce facteur.

Tableau 9: estimation du débit décennal

	A	P ₁₀ moy(mm)	Lr 10 (mm)	Qmax 10 ans (m ³ /s)	Vol. ruis 10 (10 ³ m ³)	Vol. crue 10(10 ³ m ³)	T _B (mn)
Nord-Ouest Loudia Ouolof	1.027	173.2	17.8	1.784	10	1	119
BV Loudia Diola	0.947	159.6	15.1	3.076	51	10	130
BV Loudia Ouolof n°1	0.904	152.3	13.8	5.303	124	48	154
BV Loudia Ouolof n°2	0.924	155.7	14.4	3.861	82	22	140
BV Est Diantène	0.920	155.1	14.3	7.883	88	49	142
BV de la Forêt de Oukout	0.914	154.1	14.1	3.951	100	28	146
BV Djicomot Djiramatte	0.866	146.1	12.7	8.982	267	190	203
BV Etebemaye Haer	0.855	144.1	12.3	7.153	340	197	230
BV Kagnout	0.928	156.5	14.5	3.418	75	18	138
BV Santhiaba Ouolof	0.927	156.4	14.5	2.605	76	14	138
BV Forêt classée de Kaem	0.911	153.7	14.0	6.106	106	46	148
BV Pépérie de la ville Oussouye	0.969	163.4	15.8	2.829	32	6	125
BV Pépérie de la ville Oussouye n°2	1.006	169.7	17.1	2.205	15	2	120
BV Pépérie de la ville Oussouye n°3	0.987	166.5	16.4	3.290	22	4	122
BV de la ville Oussouye	0.869	146.4	12.7	6.610	255	133	199
BV Siganar	0.930	156.8	14.6	5.643	72	28	137
BV Emaye	0.866	146.1	12.7	8.901	267	188	203
BV Emaye n°2	0.871	146.9	12.8	8.424	243	160	194
BV Emaye n°3	0.972	163.9	15.9	3.877	30	7	124
BV Emaye n°4	0.900	151.7	13.7	4.989	134	49	157
BV Emaye n°5	0.986	166.2	16.4	3.383	23	5	122
BV Emaye n°6	0.980	165.2	16.2	2.451	26	4	123
BV Près de Bugim	0.894	150.7	13.5	6.860	153	78	163
BV Près de Bugim n°2	1.032	174.0	17.9	1.783	9	1	118
BV Près de Doudame	0.925	155.9	14.4	4.728	80	26	139
BV Santhiaba Mandjak	0.894	150.8	13.5	7.812	150	87	162
BV Près de Sucujaque	0.951	160.3	15.2	3.201	47	10	129
BV Bolong Essaout	1.034	174.4	18.0	1.041	8	0	118
BV Bolong Essaout n°2	1.018	171.6	17.5	1.712	12	1	119
BV Bolong Essaout n°3	0.940	158.5	14.9	4.666	58	18	133
BV Camino de Ziguinchor	0.884	149.0	13.2	8.382	187	119	175
BV Parc National de la Basse Casamence	0.936	157.9	14.8	4.261	63	18	134
BV Parc National de la Basse Casamence n°2	0.945	159.3	15.1	4.160	53	15	131
BV Boukitingo-Emaye	0.896	151.0	13.5	6.755	147	73	161
BV Sud Boukitingo	0.977	164.7	16.1	3.402	27	6	123

ETUDE D'EVALUATION DES POTENTIALITES DES RESSOURCES EN EAU DU PLATEAU D'OUSSOUYE

	A	P ₁₀ moy(mm)	Lr 10 (mm)	Qmax 10 ans (m3/s)	Vol. ruis 10 (10 ³ m3)	Vol. crue 10(10 ³ m ³)	T _B (mn)
BV Boukitingo	0.878	148.1	13.0	7.843	210	126	183
BV Nord-Est Essaout	1.002	169.0	16.9	2.033	16	2	120
BV Bolong des Crocodiles	0.946	159.6	15.1	2.952	51	10	130
BV Nord Essaout	0.934	157.5	14.7	4.153	66	19	135
BV Diantène	0.919	155.0	14.2	3.818	90	24	142

2.3 RESULTATS DES investigations géologiques et des TRAVAUX géophysiques

Ces travaux ont principalement servi à la confection du rapport R2 portant sur la géométrie des aquifères du plateau de Oussouye et sont résumés ci-dessous :

2.3.1 Contenu des investigations géologiques réalisés

Dans le cadre de la présente mission, nous avons pu à travers la revue documentaire, l'exploitation des rapports des quelques forages et sondages existants dans la zone, faire un état des connaissances sur la structure géologique et hydrogéologique du plateau de Oussouye.

2.3.2 Contenu des travaux réalisés

L'objet des travaux de prospection géophysique est de compléter les informations sur la structure géométrique et la présence éventuelle de sel dans les différentes unités aquifères de la zone de l'étude. Les travaux de prospection géophysique ont été réalisés en utilisant la méthode de sondage électrique au niveau points choisis en concertation avec l'équipe d'experts.

Ces points de sondage ont par ailleurs servi à faire quelques profils géo-électriques permettant la corrélation des résultats dans l'espace.

La méthode du SEV consiste à injecter un courant électrique (quelques dizaines de milliampères) dans le sol par un circuit (AB) et à mesurer entre deux électrodes M et N la différence de potentiel créée par ce courant. Un sondage électrique consiste donc à établir la courbe de variation de la résistivité apparente des terrains, en fonction de la profondeur, grâce à un quadripôle AMNB. La profondeur d'investigation augmente lorsque la distance entre les électrodes d'injection A et B augmente. Le dispositif choisi est du type Schlumberger c'est-à-dire le rapport $AB/MN < 20$ et la profondeur d'investigation est comprise entre $AB/4$ et $AB/12$. Le programme d'inversion ATO sera initialement utilisé pour générer un modèle de départ qui sera amélioré avec le programme d'interprétation QWSELN établi par le CNRS et l'IRD. Le programme IX1D de Interpex limited peut être utilisé en guise de comparaison.

Toutes les informations fournies par les logs géo-électriques permettront de dresser des cartes d'iso valeurs :

- de variations latérales de la profondeur du toit des nappes ciblées ;
- de variations latérales de la profondeur de la base des aquifères ;
- de variations latérales de son épaisseur ;
- des sites les plus favorables pour l'implantation de forages productifs seront identifiés ;
- des caractéristiques techniques prévisionnelles de chaque forage à réaliser.

La carte qui suit représente le lieu de ces sondages ainsi que les coupes géo-électriques sérieées.



Figure 6 : Carte de sondage électrique et coupe géo-électrique

2.3.3 Résultats des investigations géologiques

La coupe géologique (Ouest-Est) et les cartes qui suivent résument l'état des connaissances sur la géométrie des aquifères présents dans la zone de l'étude qu'on peut résumer comme suit :

- Le premier niveau aquifère rencontré est celui contenu dans des horizons sablo-argileux ou argilo-sableux du Continental Terminal dont l'épaisseur saturée ne dépasse pas 30 mètres.. La qualité de l'eau de cette nappe est reconnue comme étant bonne dans presque toute la zone de l'étude excepté les endroits proches de cours d'eau de surface atteints par l'invasion des eaux marines salées.
- Le deuxième niveau aquifère est celui des sables et sables argileux de l'Oligo-miocène qui est séparé du premier par des niveaux argileux d'épaisseur variable mais décroissant de l'Est vers l'Ouest. A titre indicatif l'épaisseur cumulée des niveaux sableux de l'Oligo-miocène est de 37m au niveau du forage de Pointe St Georges et devrait être plus faible dans la partie Sud de la zone de l'étude. L'épaisseur des couches de séparation argileuses entre le Continental Terminal et l'Oligo-miocène peut être de l'ordre de 80 mètre dans le plateau d'Oussouye. La productivité de cette nappe est bien plus importante mais la salinité de l'eau augmente sensiblement de l'Est vers l'Ouest et peut devenir impropre à la consommation dans une bonne partie du plateau d'Oussouye.

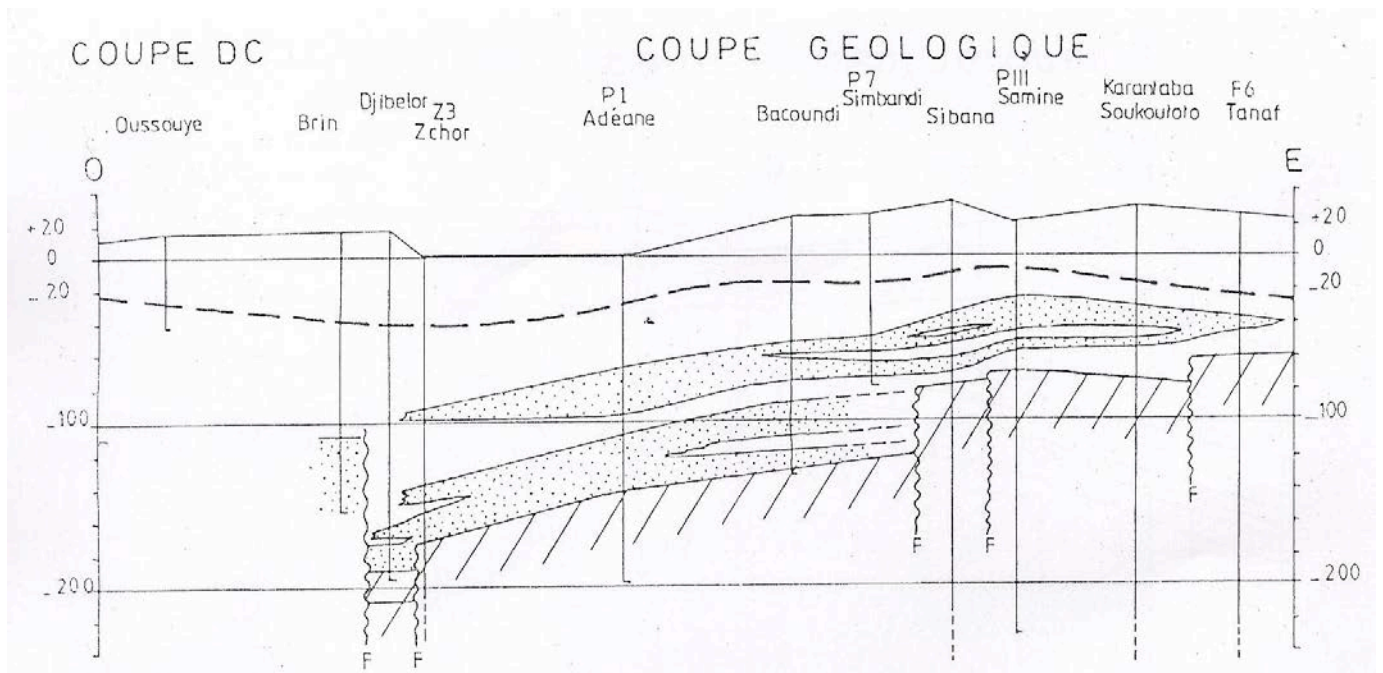


Figure 7: Coupe géologique Ouest-Est (source « Synthèse hydrogéologique du bassin sédimentaire de la Casamance DEH 1983)

La coupe géologique qui suit fait à partir des données des forages existants dans la zone a complété et précisé les informations de l'étude documentaire.

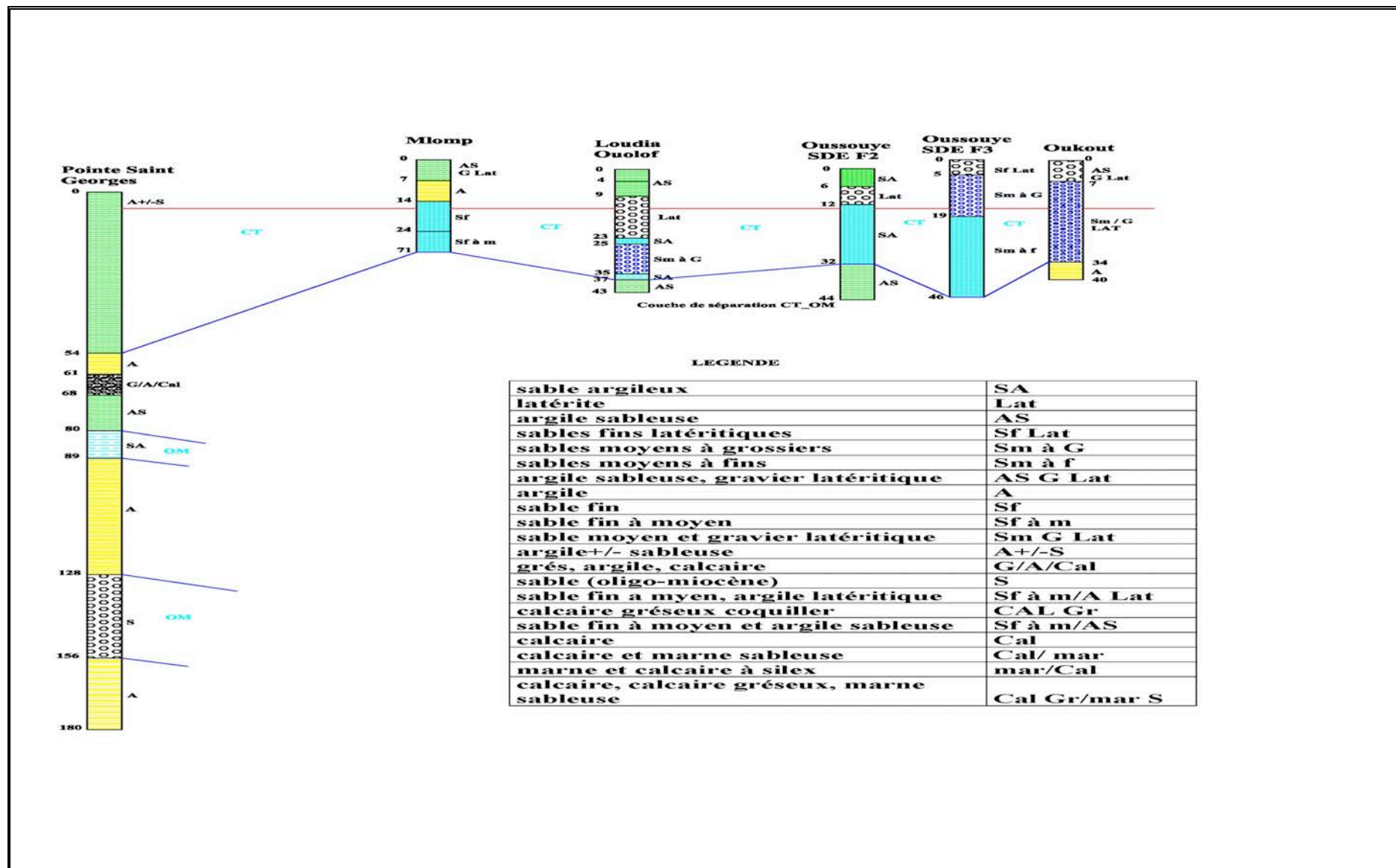
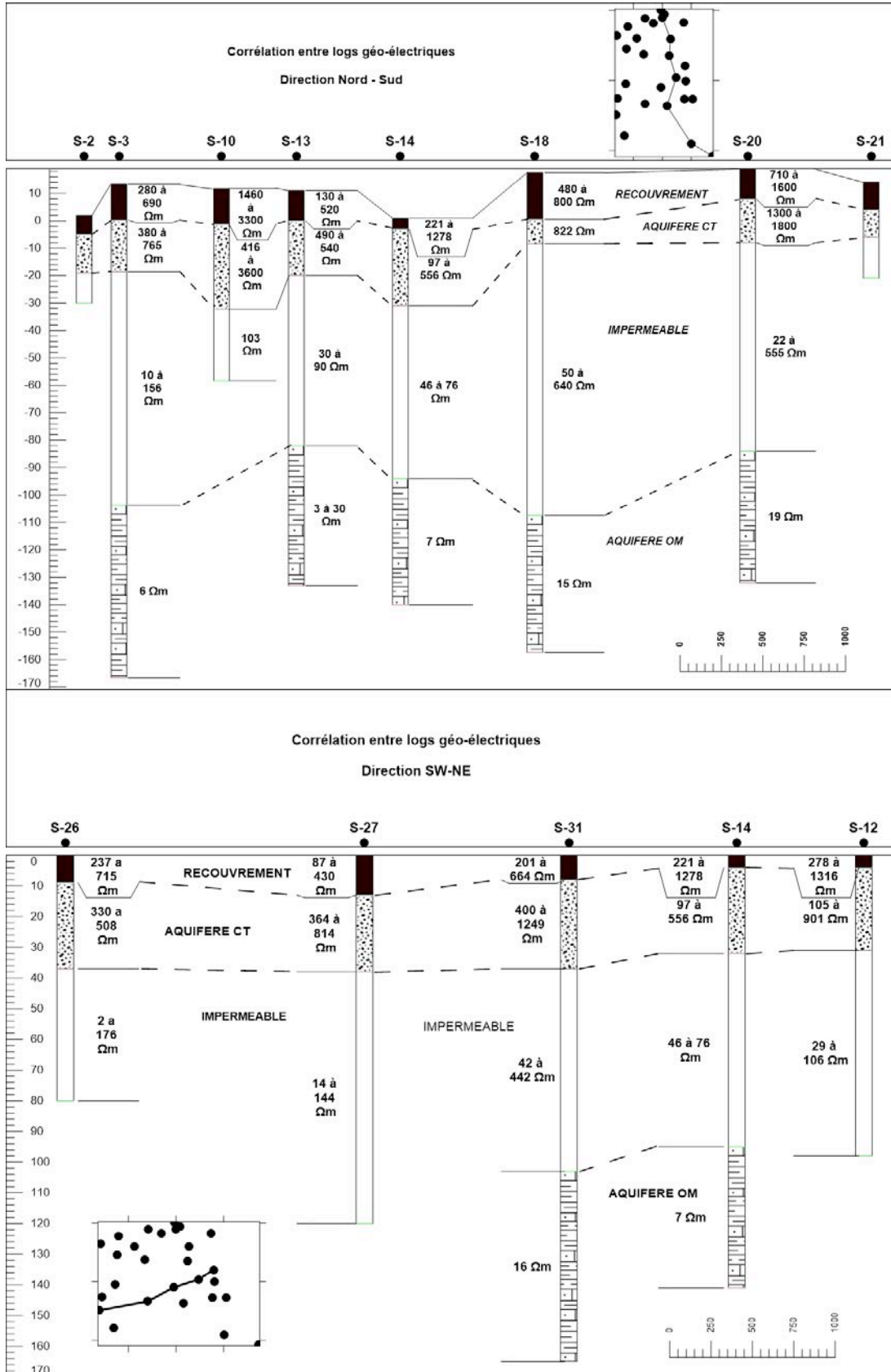


Figure 8 : Coupe géologique Nord-Sud à partir des données des forages existants

2.3.4 Résultats des travaux géophysiques

Les résultats obtenus ont permis de dresser des coupes géo-électriques dont des exemples sont ci-dessous présentés :



Ces coupes ont servi par la suite de support pour construire diverses cartes (toit, mur et épaisseur de l'aquifère du Continental Terminal).

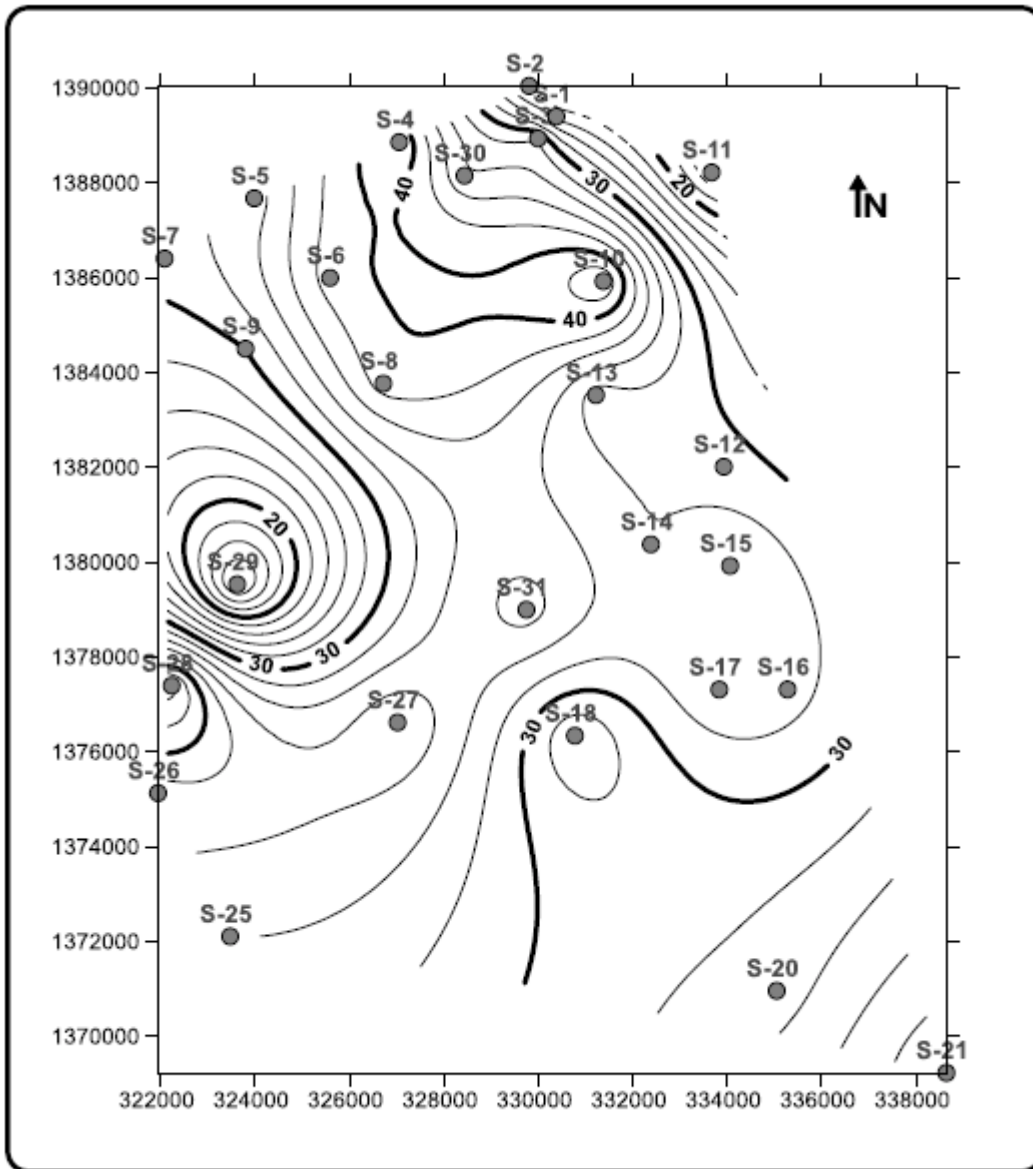


Figure 9 : Carte du mur l'aquifère du Continental Terminal (d'après résultats géophysiques)

2.4 Résultats des investigations hydrogéologiques

2.3.1 Paramètres hydrodynamiques

Les paramètres hydrodynamiques à considérer sont : les transmissivités, les coefficients d'emmagasinement de la nappe du Continental Terminal et les perméabilités des couches de séparation entre le CT et l'OM.

Signalons que pour ce qui est des coefficients d'emmagasinement et des valeurs de perméabilité verticale des couches de séparation entre les aquifères du Continental Terminal et de l'Oligo-miocène, aucune information n'est disponibles aussi bien dans les bases de données de la DGPRE que dans les rapports des études antérieures. Ces paramètres feront l'objet de calage avec le modèle à construire ; pour le second, le calage prendra en compte les épaisseurs de la couche de séparation entre le Continental Terminal et l'Oligo-miocène.

Pour la nappe du Continental terminal, quelques valeurs de transmissivités mesurées à partir d'essais de pompage réalisés à l'occasion des réceptions de forages existent. Elles sont ci-dessous présentées.

Tableau 9 : Quelques valeurs de transmissivité

Désignation	Ns (m)	Q exp	rabat (m)	T ($10^{-2}m^2/s$) ()
Oussouye SDE F2	12,9	25	13,61	
Oussouye SDE F3	12	30	23	0,41
Loudia Ouoloff	13,96	15	10,87	0,8
Mlomp	13	12	4,84	
Oukout	11,2	11,7	5,84	0,102

La densité de ces données par rapport à l'étendue de la zone de l'étude ne permet pas de dresser une carte de variation de ce paramètre. Ces valeurs seront considérées pour la construction et le calage du modèle à construire.

2.3.2 Etat des prélèvements

Les chroniques de prélèvement (pompage) sur les ouvrages de captage des eaux souterraines seront des données d'entrée pour le modèle de simulation à construire.

Les données de pompage qui seront considérées dans le cadre de cette étude sont pour la nappe du Continental terminal :

- les pompages dans les forages de la SONES à Oussouye et ceux des autres forages ruraux ;
- les pompages dans les puits villageois qui constituent une source importante d'alimentation en eau potable dans cette zone.

2.3.3 Données piézométriques

A défaut de piézomètres captant réellement cette nappe, des mesures de niveaux d'eau ont pu être faites à partir d'un échantillon de puits couvrant presque toute la zone de l'étude. Seule la partie Sud a été couverte très partiellement du fait des difficultés d'accès liées aux problèmes de sécurité. Signalons aussi que ces puits sur lesquels ces mesures de niveau ont été faites étaient en cours d'exploitation, ce qui peut biaiser les résultats obtenus. Les prélèvements opérés qui sont relativement faibles du fait que les puits alimentent souvent une ou quelques concessions, font que ce biais s'il existe serait relativement faible.

Les cartes qui suivent donnent l'état des niveaux piézométriques de la nappe du Continental Terminal à l'étiage et pendant la période des hautes eaux de 2017 et celle de la fluctuation du niveau de cette nappe entre l'étiage et les hautes eaux.

L'interprétation de ces cartes a permis de dresser les lignes d'écoulement de ces nappes qui permettent de tirer les conclusions suivantes :

- l'allure des lignes d'écoulement est pratiquement la même aussi bien en période d'étiage qu'en période de hautes eaux ;
- les lignes d'écoulement sont divergentes et partent principalement de deux zones qui sont au Nord (zone de Djikomol et Mlomp) et au centre (zone de Oukout) pour aller vers les cours d'eau de surface ;
- on observe ainsi une tendance générale d'alimentation des cours d'eau par les nappes ;
- la densité des données collectées dans le temps et dans l'espace n'a pas permis de traduire le détail des relations hydrauliques entre les nappes et les cours d'eau au voisinage de ces derniers ;
- le resserrement des lignes piézométriques vers l'Est traduit une réduction de la transmissivité de cette nappe d'Ouest vers l'est ;
- fluctuation du niveau de la nappe

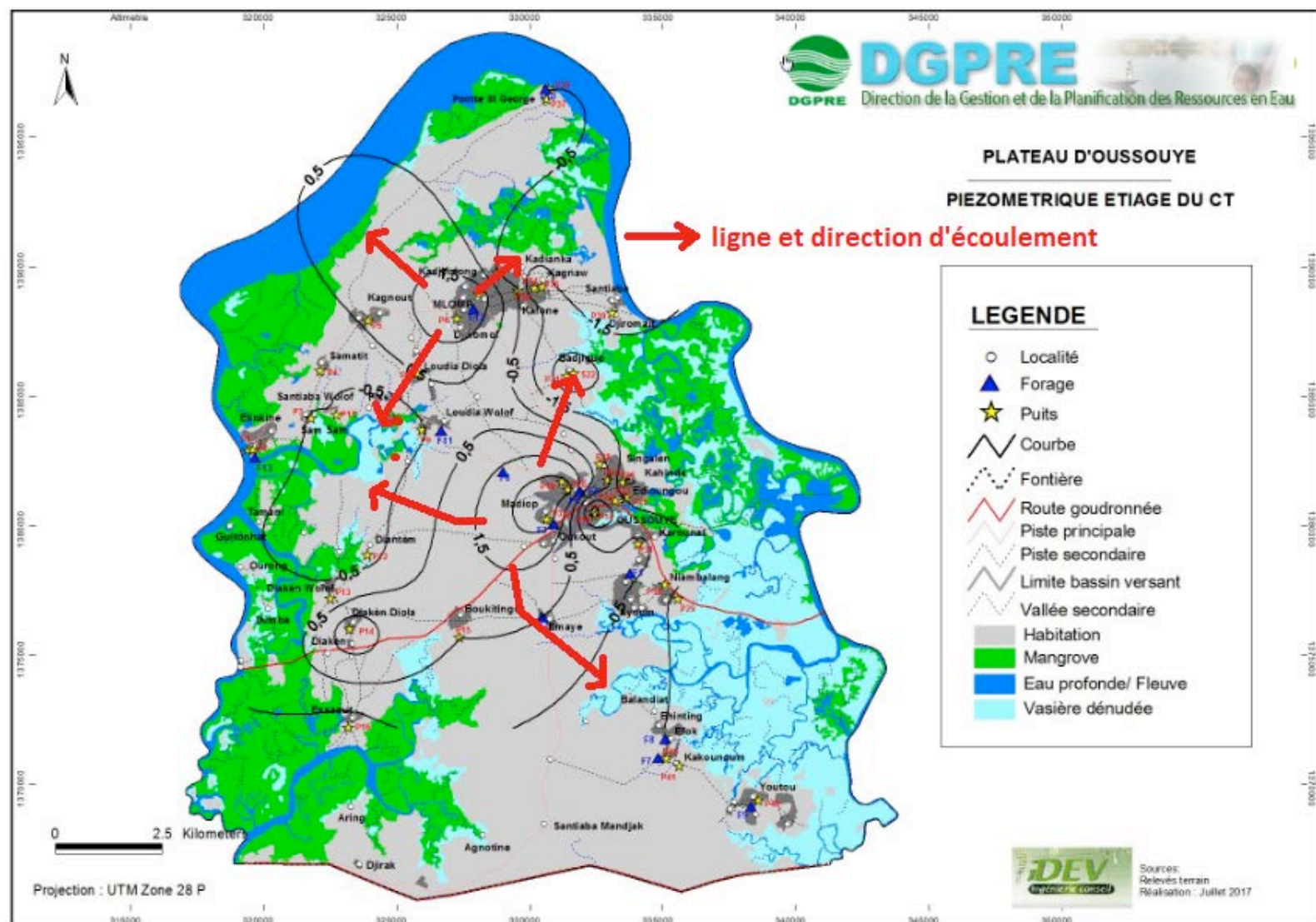
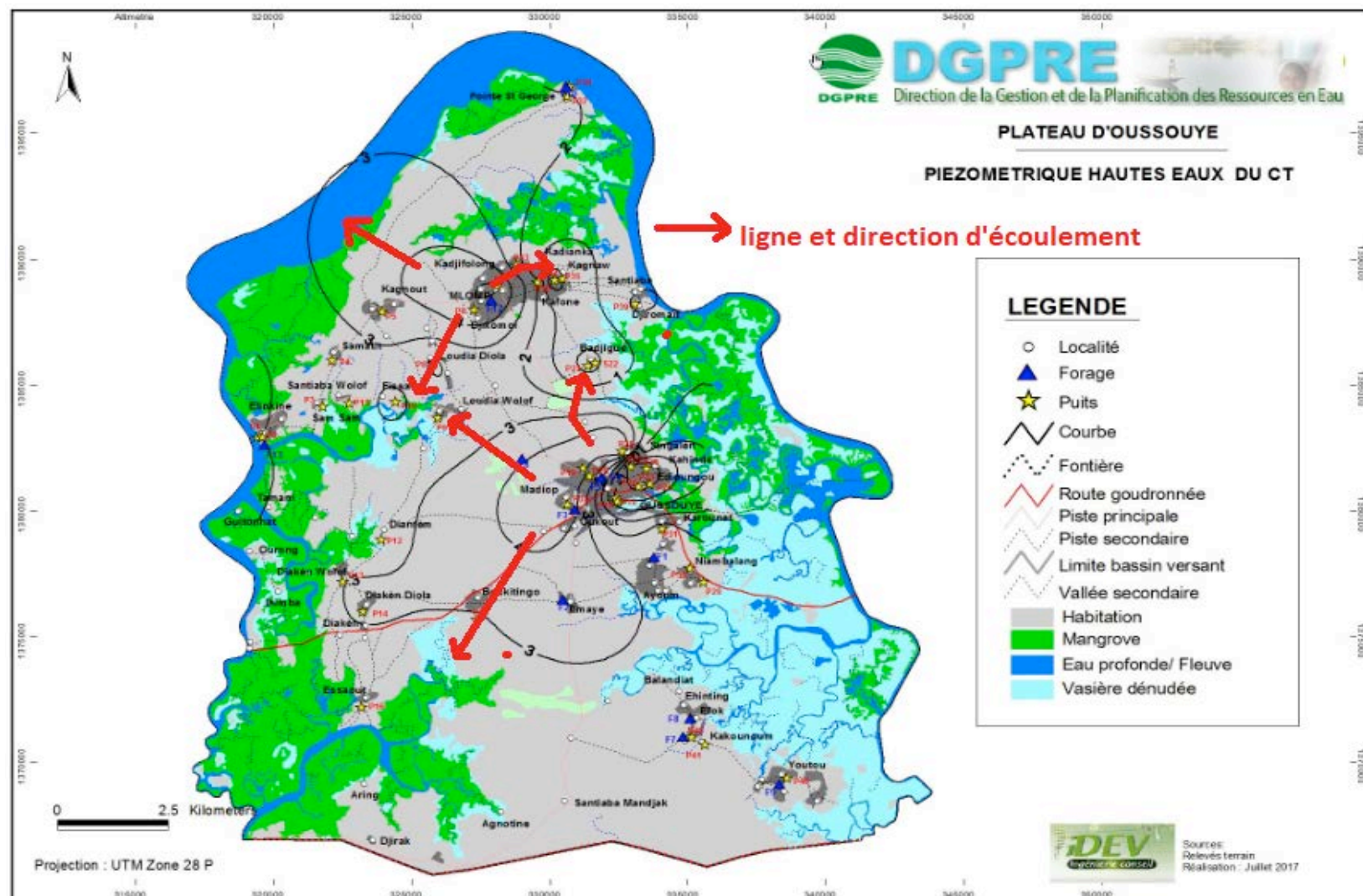


Figure 10 : Etat des niveaux piézométriques de la nappe du CT en étiage

Figure 11 : Etat des niveaux piézométriques de la nappe du CT en hautes eaux



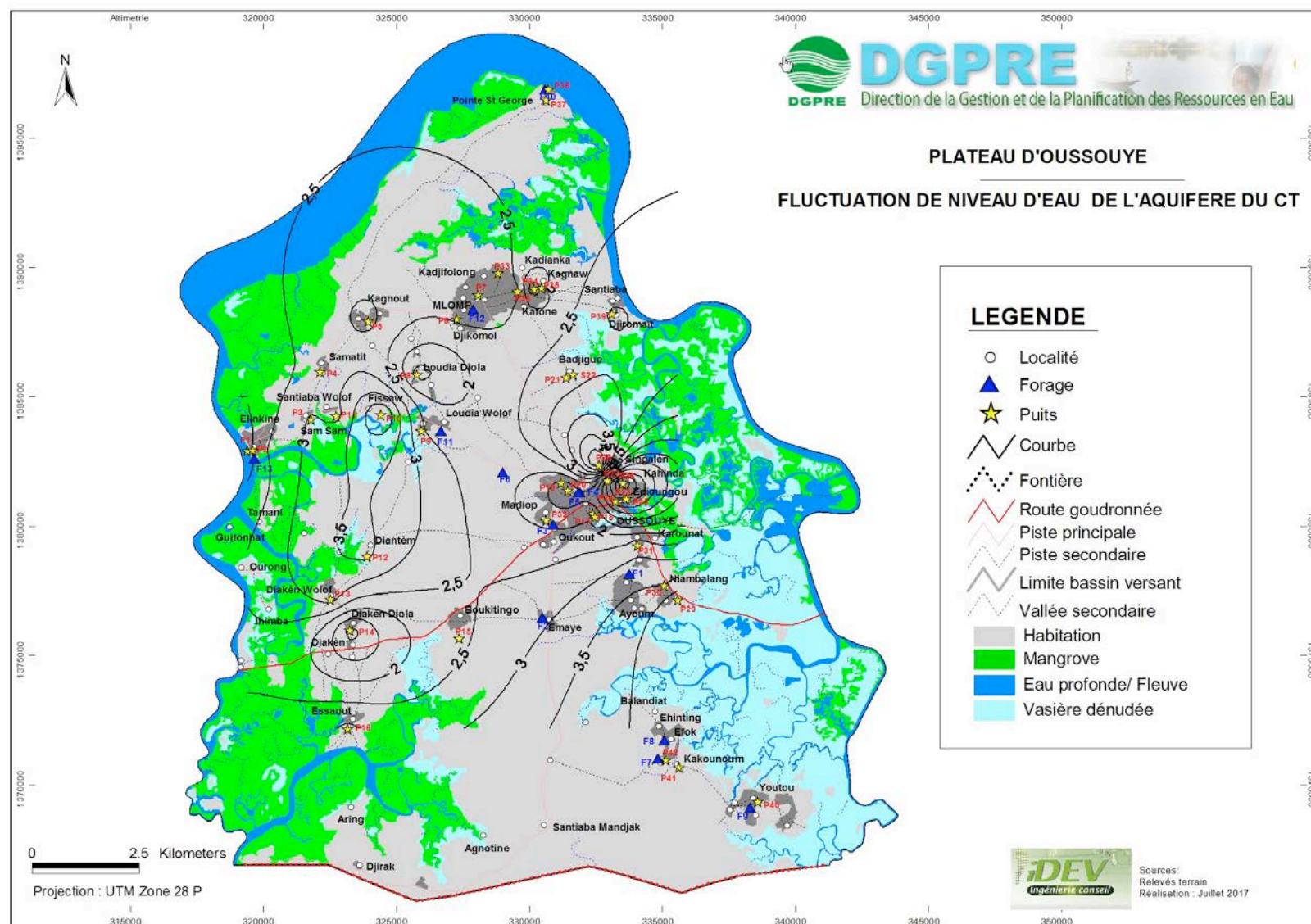


Figure 12 ; Etat de fluctuation du Continental Terminal

2.5 Résultats des investigations hydro-chimiques

2.5.1 Méthodologie et volume des travaux réalisés

Les investigations hydrochimiques ont été effectuées sur deux campagnes en Juin et Octobre 2017 ; elles concernent pour la 1ère campagne 29 points d'eau dont 4 forages ET 25 puits (Figure X), et pour la 2ème campagne 35 points d'eau tous constitués de puits (Figure x)

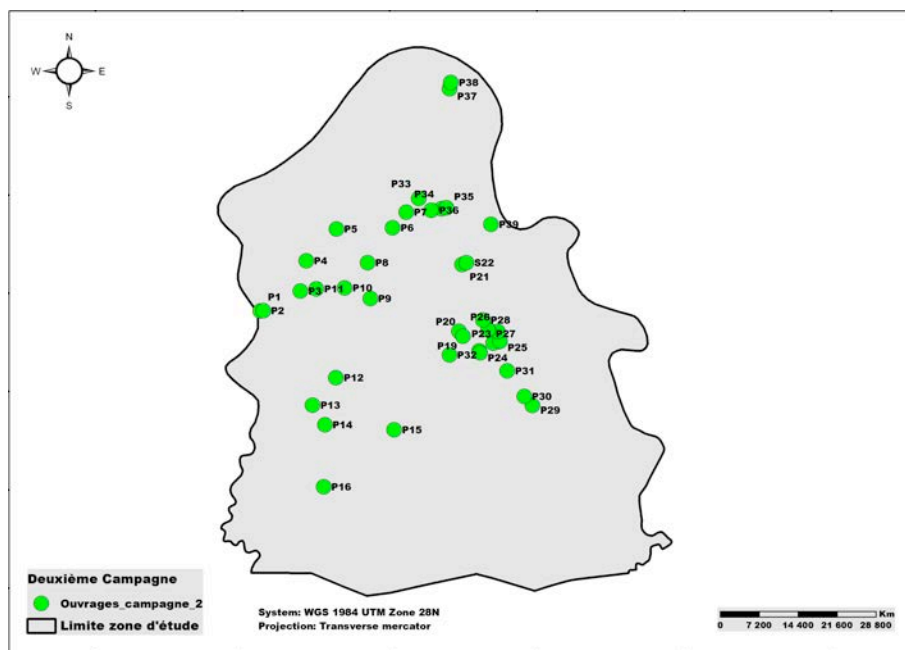


Figure 13 : Réseau de mesure campagne Juin 2017

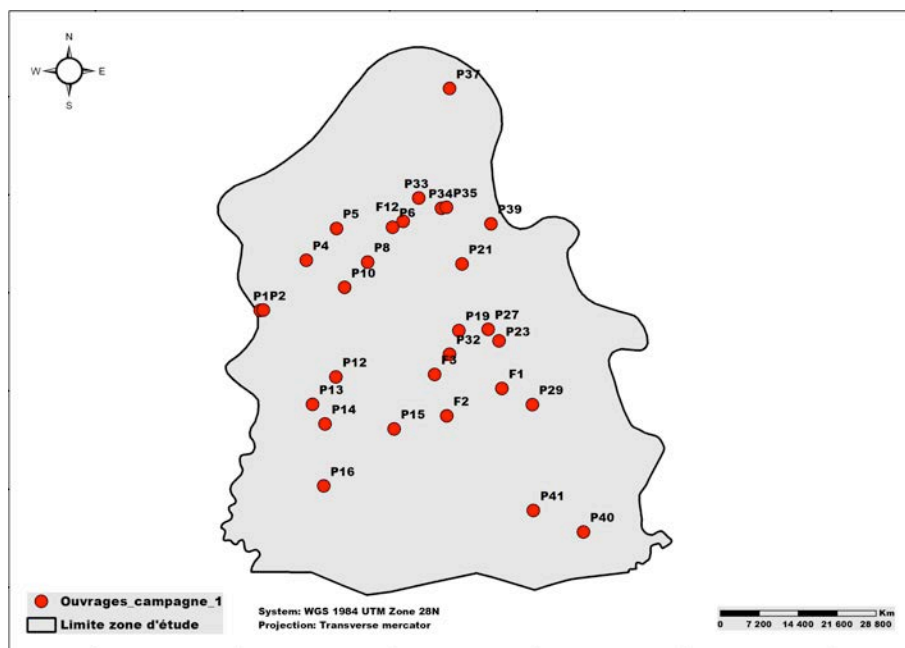


Figure 14 : Réseau de mesures campagne Octobre 2017

Les données recueillies pour la 1ère campagne comportent également celles relatives aux enquêtes de prélèvements au niveau des forages et puits de la zone du projet. Pour chaque campagne, les données in situ de coordonnées géographiques (X et Y en UTM), de niveau statique, de pH, conductivité électrique et Température ont été mesurées sur tous les points du réseau. Des échantillons de la campagne 1 ont été collectés pour analyses chimiques au laboratoire d'hydrochimie du Département de Géologie de l'UCAD où les éléments majeurs (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, CO₃²⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻ and NO₃⁻) et de quelques mineurs (Fe et PO₄). De plus des analyses bactériologiques ont été effectuées sur 10 échantillons collectés par la Brigade Régionale de l'Hygiène de Ziguichor. Elles ont portées sur les coliformes fécaux et totaux. Pour la 2ème campagne, les seules données in situ sont disponibles – les analyses chimiques sont en cours.

Le traitement des données in situ et analyses chimiques s'est fait sous ArcGis et les méthodes conventionnelles pour définir la répartition spatiale des paramètres, leurs variations suivant les saisons et les types d'eau. L'ensemble des données analytiques sont portées en annexes du présent document.

2.5.2 Résultats obtenus

Les caractéristiques physico-chimiques des données des deux campagnes ont été évaluées selon une analyse de statistique descriptive (Tableau x). Les données complètes sont portées en annexes.

Figure 10 : statistique descriptive des données physico chimiques des 2 campagnes

	CE (Etiage)	pH (Etiage)	T (Etiage)	CE (Hautes Eaux)	pH (Hautes Eaux)	T (Hautes Eaux)
Min	28.0	4.7	25.0	28.0	6.1	26.3
Max	1218.0	8.2	33.3	1314.0	8.2	29.7
Moy	258.8	6.1	29.3	342.2	7.5	27.7
Med	168.6	6.1	29.4	315.0	7.6	28.0
ET	238.9	0.6	1.8	260.9	0.6	0.9
Var	57050.6	0.4	3.3	68075.3	0.3	0.8

Les valeurs de température qui oscillent entre 25,0 et 33°C (des moyennes et médianes à l'étiage et en hautes eaux entre 27.7 et 29.4 °C) reflètent bien le caractère superficiel de la nappe du CT où les échanges thermiques se font facilement à la faveur de la température ambiante. La faible valeur d'écart type (0.9 – 1.8) et de variance (0.8-3.3) montre que les valeurs de température sont relativement homogènes.

Les valeurs de pH par contre reflètent le caractère généralement faiblement acide à neutre des eaux de la nappe du CT. Elles varient de 4.7 minimum à 8.2 maximum avec des moyennes et médianes entre 6.1 et 7.6 selon les saisons. Les faibles valeurs d'écart type et de variance indiquent le caractère homogène des eaux. Les eaux acides de pH inférieur à 5 sont notées aux P9, P32 et F2. Toutefois, il faut souligner que le caractère plus acide de la nappe en période d'étiage comparé à la période des hautes eaux où la nappe tend vers la neutralité.

La conductivité électrique qui exprime la minéralisation globale des eaux varie de 28 à 1314 µs/cm avec une variance et des valeurs d'écart type très grandes traduit des sources, des processus géochimiques et de dilution variables selon les zones. Les plus faibles valeurs sont observées dans la zone centre et elles augmentent graduellement vers l'Ouest, l'Est et le Nord. Les valeurs moyennes et médianes entre 168 et 342 µs/cm indiquent des eaux faiblement minéralisée qui ont tendance à se charger en période de hautes eaux. Ce dernier processus est bien connu dans les nappes superficielles où l'acquisition de la minéralisation se fait par dissolution des sels de surface mais également par une mobilisation des ions par réactions géochimiques lors du processus

d'infiltration. Les très faibles valeurs observées dans la zone centrale indiquent des zones préférentielles de recharge même si cette dernière semble s'opérer dans l'ensemble de la zone du projet du fait du caractère très superficielle de la nappe. Seuls deux ouvrages suivis ont montré des valeurs de CE supérieures à 1000 $\mu\text{s/cm}$ mais les teneurs en Cl et Na ne semblent pas indiquer une contamination saline. Pour ce dernier phénomène, nous allons nous focaliser sur les résultats des sondages électriques qui dans ce contexte est un puissant outil pour l'identification et l'extension de ce biseau comme nous allons le voir dans la partie qui traite la salinisation.

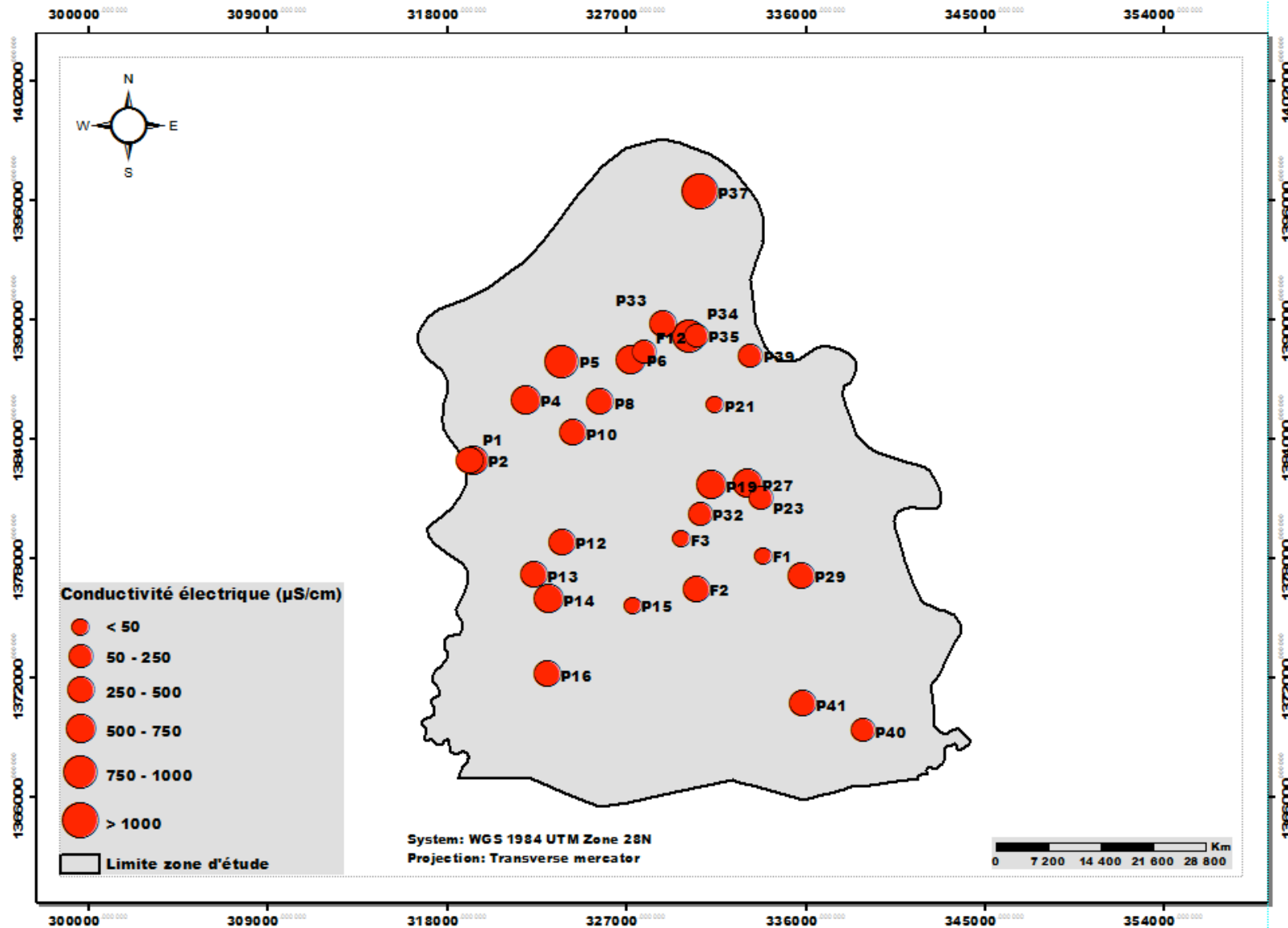


Figure 15 : Distribution des valeurs de CE de la campagne 1

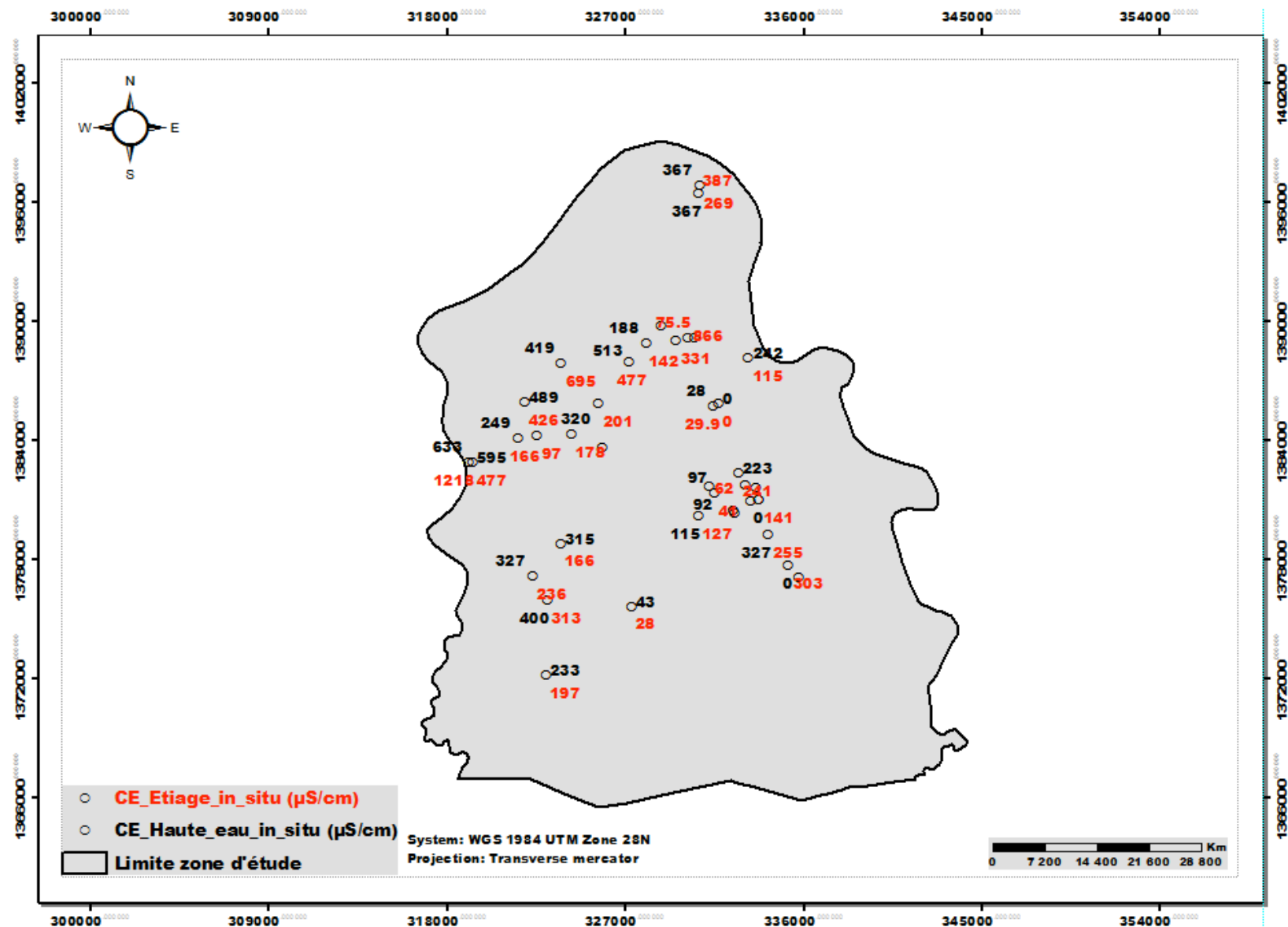


Figure 16 : Distribution des valeurs de CE mesurées lors des deux campagnes

Des analyses chimiques relatives aux ions majeurs et quelques éléments mineurs comme le phosphore (PO₄⁻) et le Fer (Fe) ont été effectuées sur les 29 points sélectionnés et distribués spatialement sur la zone du projet. Elles montrent qu'au-delà de l'ouvrage Pointe Saint George/PADERCA toutes les eaux échantillonnées sont de très bonne qualité et les teneurs en ions sont bien en-deçà des normes de potabilité de l'OMS. Le tableau x de données statistiques ci-après présentés définit les valeurs minimales, maximales, moyenne et écart type. Elles confirment dans la majorité des eaux douces et potables à l'exception des teneurs en Fer où les valeurs moyennes et médianes sont supérieures à la norme OMS. Une valeur maximale atteignant à 4.6 mg/l a été mesurée sur l'ouvrage de Djiromait P16. L'occurrence de fer dans ce type de formation est évidente du fait que le CT résulte principalement de produit d'altération du Pliocène ou du Mio – Pliocène avec des ensembles de sédiments détritiques allant du terme sable grossier au sable fin, sable argileux et argile sableuse entrecoupés par des niveaux discontinus d'argiles, de grès argileux fins, grès ferrugineux fins, d'argiles ferruginisées fossilifères.

Les valeurs d'écart type et de variance sont généralement élevées pour l'ensemble des ions à l'exception des ions NO₃, K et Fe ; elles traduisent une typologie des faciès d'eau variés et des processus géochimiques variables qui restent toujours dans la gamme des eaux douces. Les faibles valeurs de NO₃ (max 15.8 mg/l), PO₄ et K de même que les variances et écart type calculés montrent bien que la nappe est très faiblement polluée.

Tableau 13 : statistique descriptive des données hydrochimiques

Paramètres chimiques	N Actifs	Moyenne	Médiane	Minimum	Maximum	Variance	Ecart-Type	Normes OMS	Unité de mesure
CO ₃ ⁻	29	15.52	0.00	0.00	450.00	6982.8	83.56	-	mg/l
HCO ₃ ⁻	29	59.84	51.85	0.00	213.50	2933.2	54.16	250	mg/l
Cl ⁻	29	44.49	27.90	5.13	231.42	2751.9	52.46	250	mg/l
SO ₄ ²⁻	29	9.55	0.15	0.02	119.76	564.7	23.76	250	mg/l
NO ₃ ⁻	29	2.91	1.38	0.06	15.80	14.7	3.84	50	mg/l
Ca ²⁺	29	42.31	21.20	2.16	570.30	10719.7	103.54	100	mg/l
Mg ²⁺	29	6.25	2.67	0.24	78.69	204.9	14.32	50	mg/l
Na ⁺	29	19.94	11.72	2.10	112.40	664.6	25.78	150	mg/l
K ⁺	29	2.17	0.45	0.05	9.82	9.1	3.01	12	mg/l
Fe	29	0.51	0.40	0.01	4.60	0.8	0.87	< 0.3	mg/l
PO ₄ ⁻	29	0.12	0.00	0.00	2.42	0.2	0.45	-	mg/l

Les données introduites dans le diagramme de Piper mettent en évidence des faciès qui sont de trois types bicarbonaté calcique, chloruré sodique et chloruré calcique (Figure x) qui sont inégalement distribués dans le plateau d'Oussouye (Figure x). Toutefois on note une prédominance du faciès bicarbonaté calcique dans la zone centrale qui pourrait résulter de la dissolution de minéraux calciques ou de l'arrivée des eaux d'infiltration qui également peut être à l'origine du faciès chlorure calcique. Par contre le type chlorure sodique proviendrait en grande partie des phénomènes d'échange de base si l'on tient compte que les ouvrages investigués n'ont pas été affectés par une intrusion saline. La distribution des valeurs de l'ion chlorure confirme les hypothèses émises ci haut à savoir une recharge privilégiée dans la zone centrale caractérisée par de faibles valeurs et sur les flancs de l'écoulement des concentrations deviennent de plus en plus élevées du fait des processus physiques d'évaporation, d'échanges anioniques et cationiques et de réactions géochimiques de dissolution et d'hydrolyse de minéraux.

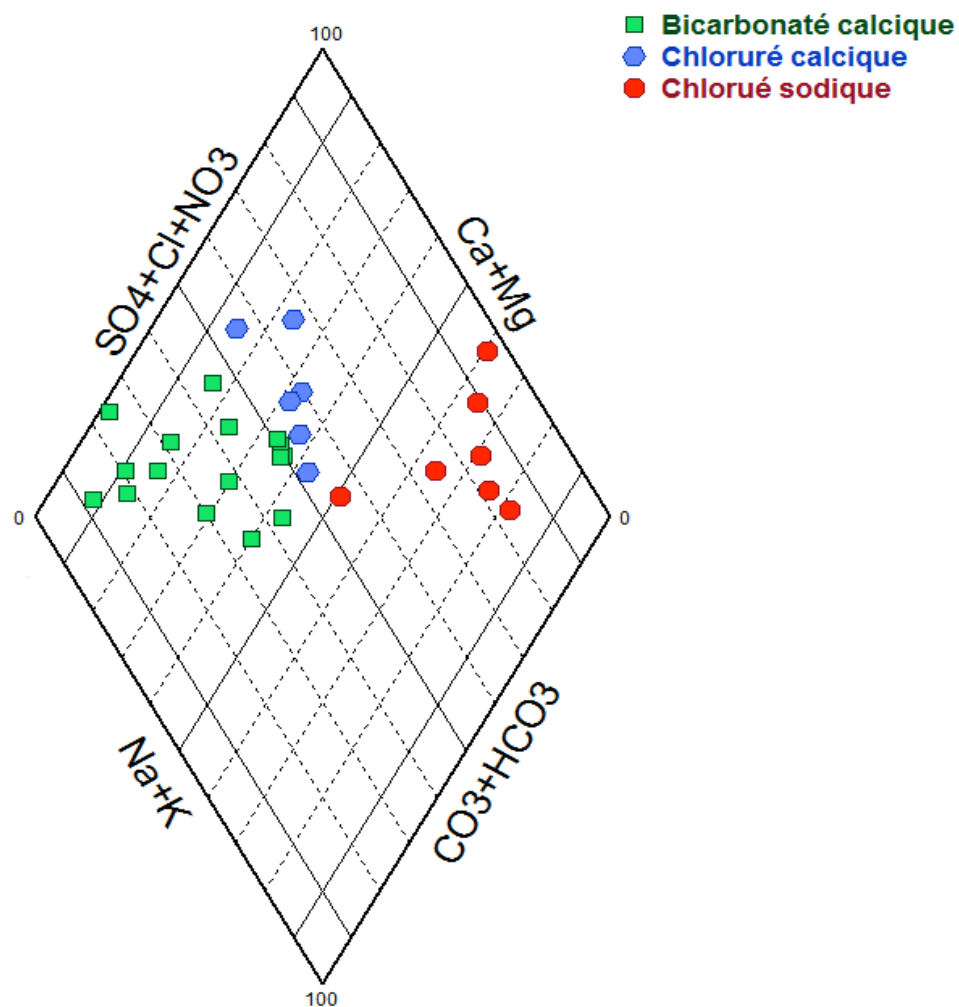


Figure 16: diagramme de Piper représentant les faciès chimiques

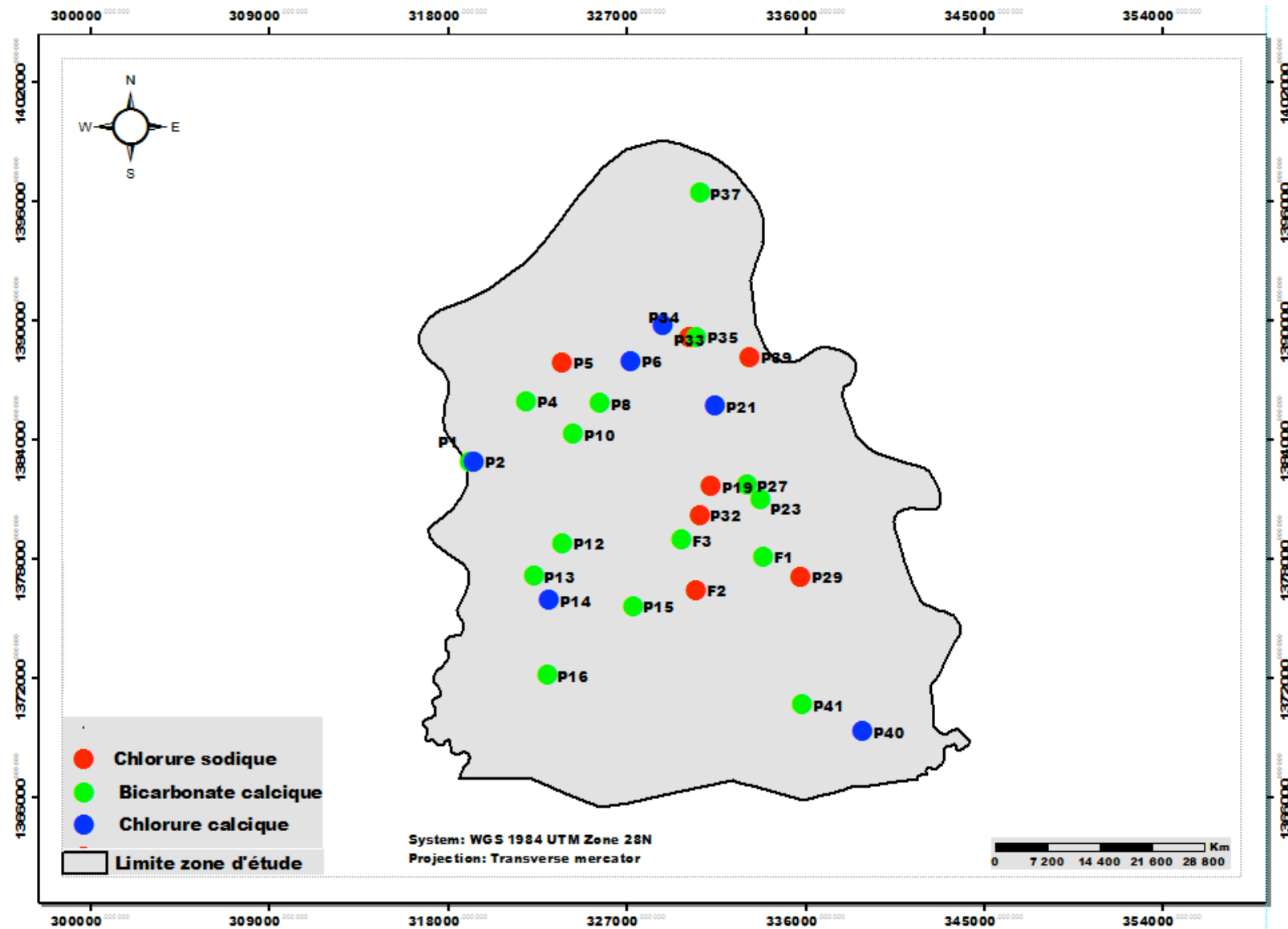


Figure 17 : carte de répartition de faciès d'eau

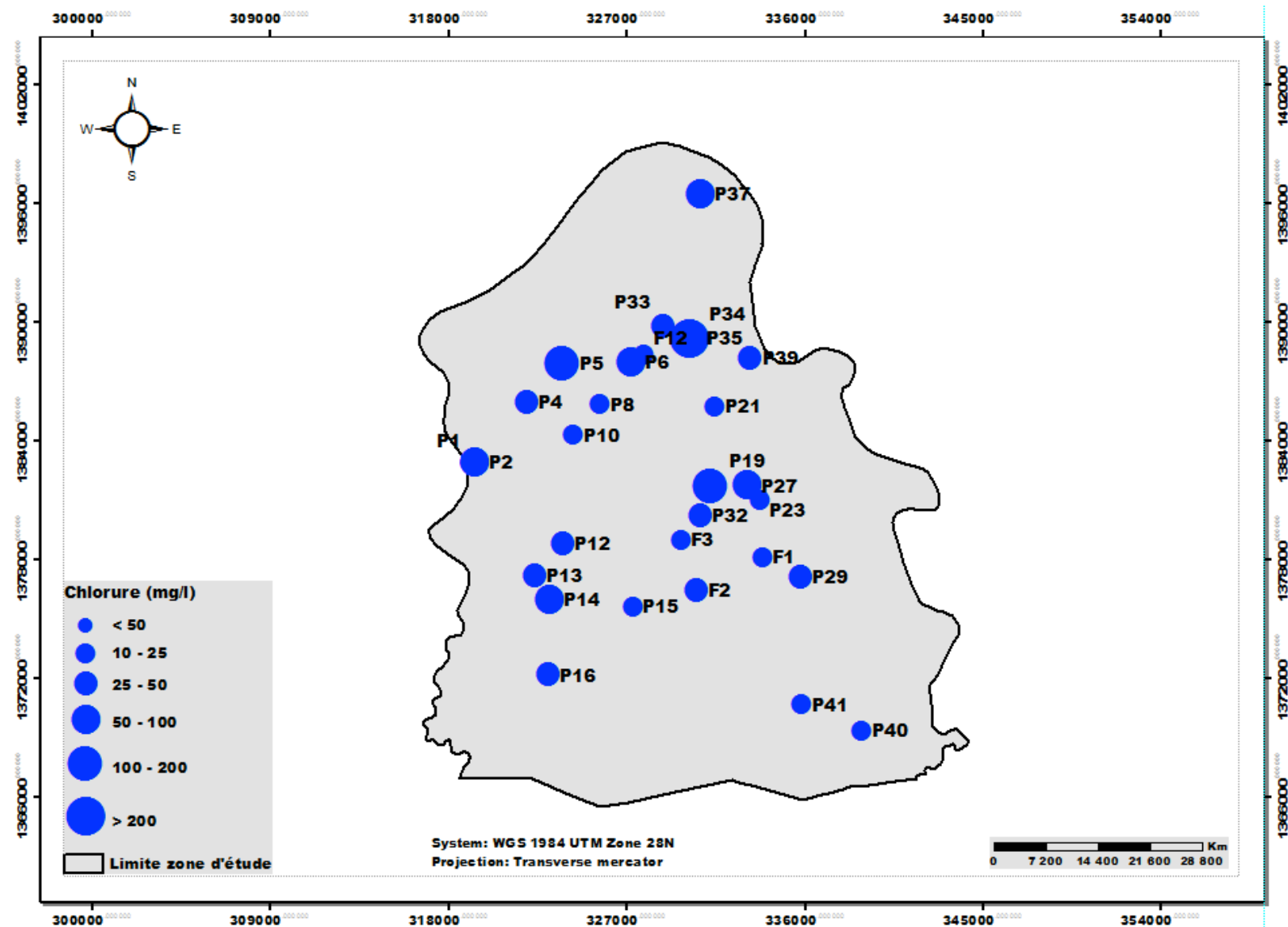


Figure 18: distribution des teneurs en chlorure Juin 2016

En somme, du point de vue qualité de la ressource, les caractéristiques physico chimiques et chimiques obtenues lors des investigations montrent une nappe de qualité excellente à l'exception des teneurs en Fer qui sont relativement élevées du fait de la nature de la formation aquifère. L'état de la pollution anthropique (domestique et agricole) est également très faible même dans ce contexte de nappe superficielle de faible profondeur. Les analyses bactériologiques sur les coliformes totaux qui sont des indicateurs de pollution à partir de matière fécales mais également qui peuvent se développer dans les milieux naturels (sols, végétation, eau naturelle) montrent une population de 0 UFC/100ml à l'exception des puits de Essaout (556 UFC), Oussouye/Bzintene (154 UFC) et Sigonor 5UFC).

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 1.98 m (moyenne) avec un maximum de 5.54 m entre les deux campagnes de mesure effectuées dans le cadre de la mission. Ces forts taux de recharge sont les principaux facteurs de dilution de l'eau de la nappe superficielle dans le plateau d'Oussouye. Mais du fait de sa position géographique et de ses limites naturelles constituées par les bolons et le fleuve Casamance, il est très fort probable qu'il y ait occurrence de l'intrusion saline en dessous de la nappe d'eau.

Les investigations géophysiques par SE réalisées dans le cadre de cette mission ont effectivement identifié la présence d'eau salée de résistivités très faibles (inférieures à 10 ohm.m) dans les localités situées sur la lisière des bolons à des profondeurs de plus de 90m. Ces profondeurs peuvent bien se justifier si l'on tient compte de la loi de Ghyben Herzberg et des niveaux piézométriques à + 2m dans ces ouvrages. Les SE concernés sont SE10, SE11, SE12, SE15, SE16 et SE30. Par dans les sondages profonds réalisés, les eaux salées sont localisées à plus de 100 m de profondeur au centre du plateau (SE3, SE18 et SE31) (Figure x). Cette configuration met en évidence la connexion hydraulique bolon/nappe et l'intrusion saline qui se marque en sous la nappe d'eau douce à des profondeurs allant de 90 à plus de 130m.

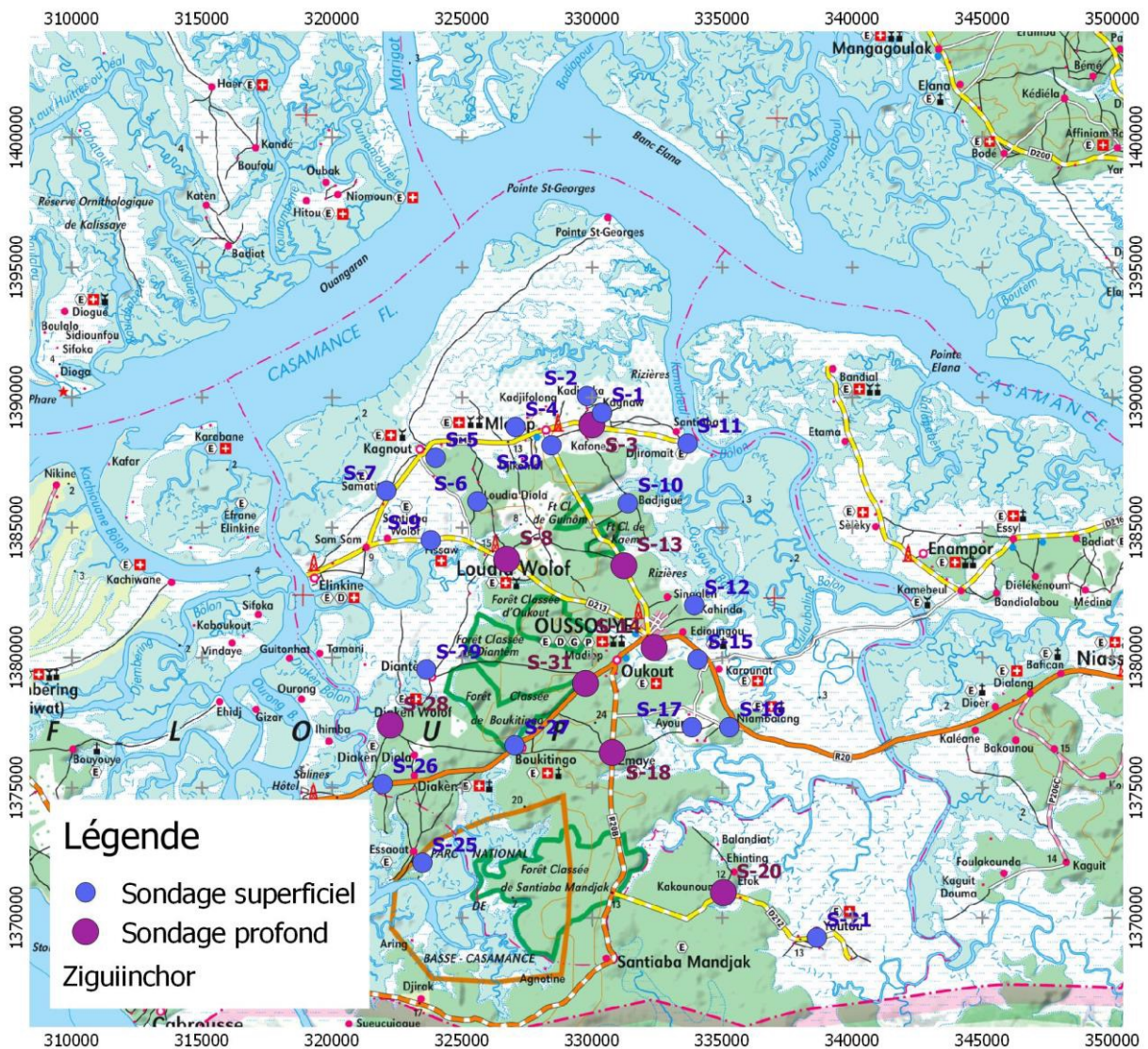


Figure 19 : localisation des SE réalisés

2.6 Alimentation des nappes

Les processus d'alimentation des nappes par les pluies et l'évaluation des volumes d'eau infiltrés ont été étudiés selon deux approches :

- un bilan au pas de temps annuel entre les termes du cycle de l'eau (pluie, évapotranspiration, écoulement de surface et infiltration) par la méthode Turc ;
- l'étude des fluctuations du niveau des nappes du Continental Terminal mesurées pendant la période 1979 à 1981 dans le cadre de l'étude du bassin sédimentaire de la Casamance.

Les résultats obtenus par la méthode du bilan du cycle de l'eau n'ont pas été précis du fait du pas de temps grand utilisé. Ainsi, nous avons plutôt utilisé les résultats obtenus à partir de l'étude des fluctuations du niveau de la nappe du CT qui sont ci-dessous présentés :

Des fluctuations du niveau de l'eau dans des piézomètres captant la nappe du Continental Terminal dans la partie Ouest de zone Sédhio (la plus proche de notre zone d'étude) sont représentées par les figures qui suivent.

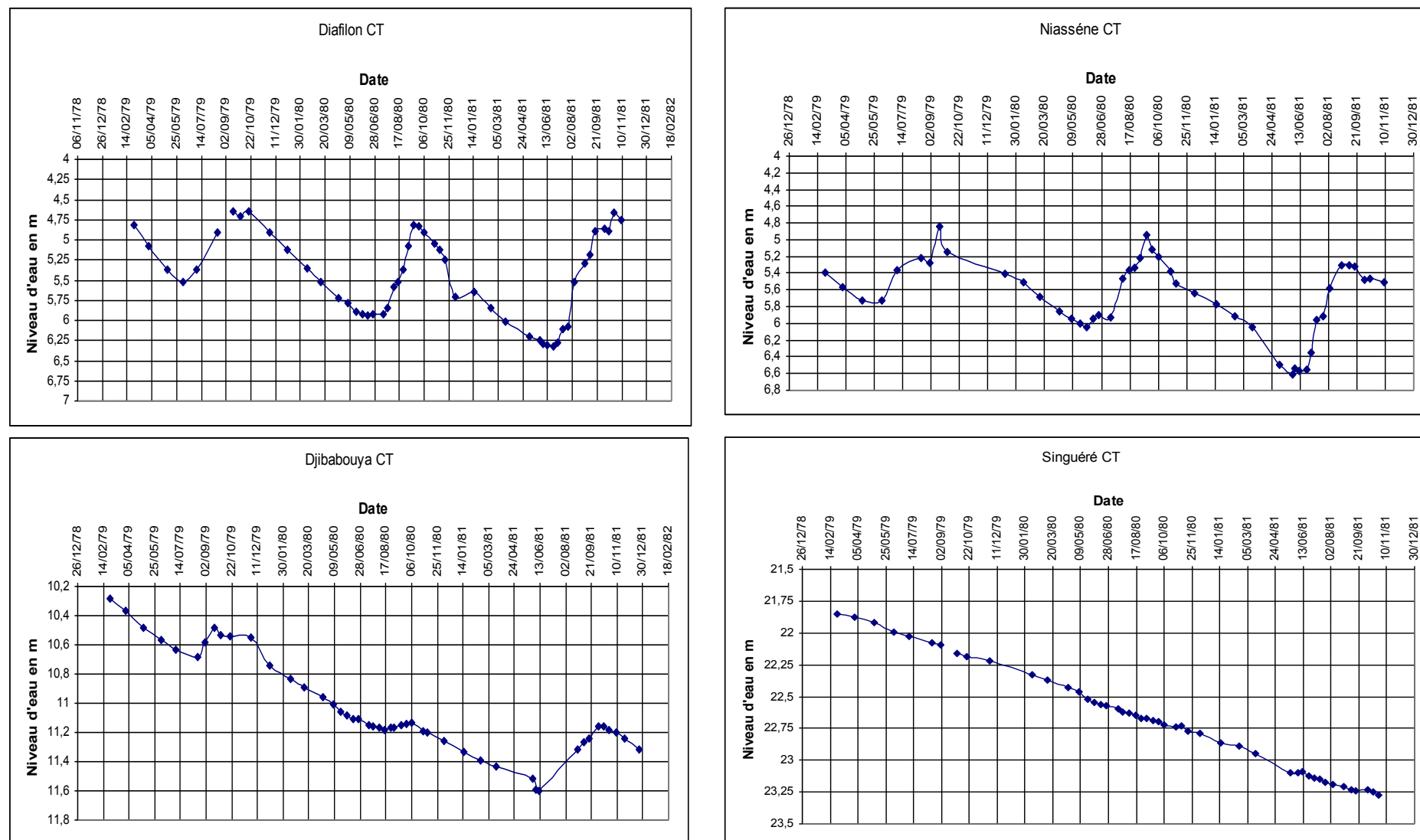


Figure 20 : Evolution du niveau de la nappe du CT dans quelques piézomètres (sources Etude hydrogéologique du bassin sédimentaire de la Casamance)

Le tableau qui suit présente une synthèse de ces données qui a permis de tirer quelques conclusions:

- La fluctuation du niveau de la nappe suite à son alimentation par les pluies est fonction de sa profondeur et de l'importance de la hauteur des pluies tombées ;
- Cette fluctuation est 1,5m pour une profondeur de la nappe de près de 5m et elle décroît pour être presque nulle quand la profondeur de la nappe est de l'ordre de 25m ;
- Cette dernière tendance ne doit signifier que la nappe n'est pas rechargée par les pluies quand sa profondeur dépasse 25m mais que la recharge devient à cette profondeur faible et diffuse.

Signalons que les fluctuations du niveau de la nappe du Continental Terminal mesurées dans le cadre de cette étude au niveau des puits (figure 12 chapitre 2.3.3.) vont jusqu'à plus 3,5m pour l'année 2017 relativement pluvieuse.

Tableau 14 : Synthèse des données de l'évolution du niveau du CT

Sites		Diafilon	Niassène	Djibabouya	Singuéré
Niveau max observé		6,32	6,6	11,6	21,85
Niveau min observé		4,65	4,84	10,28	23,27
Année	Pluie an	Fluctuation annuelle du niveau de la nappe du CT			
1979	883,7	0,87	0,88	0,2	
1980	618,7	1,11	1,1		
1981	1030,5	1,66	1,29	0,44	

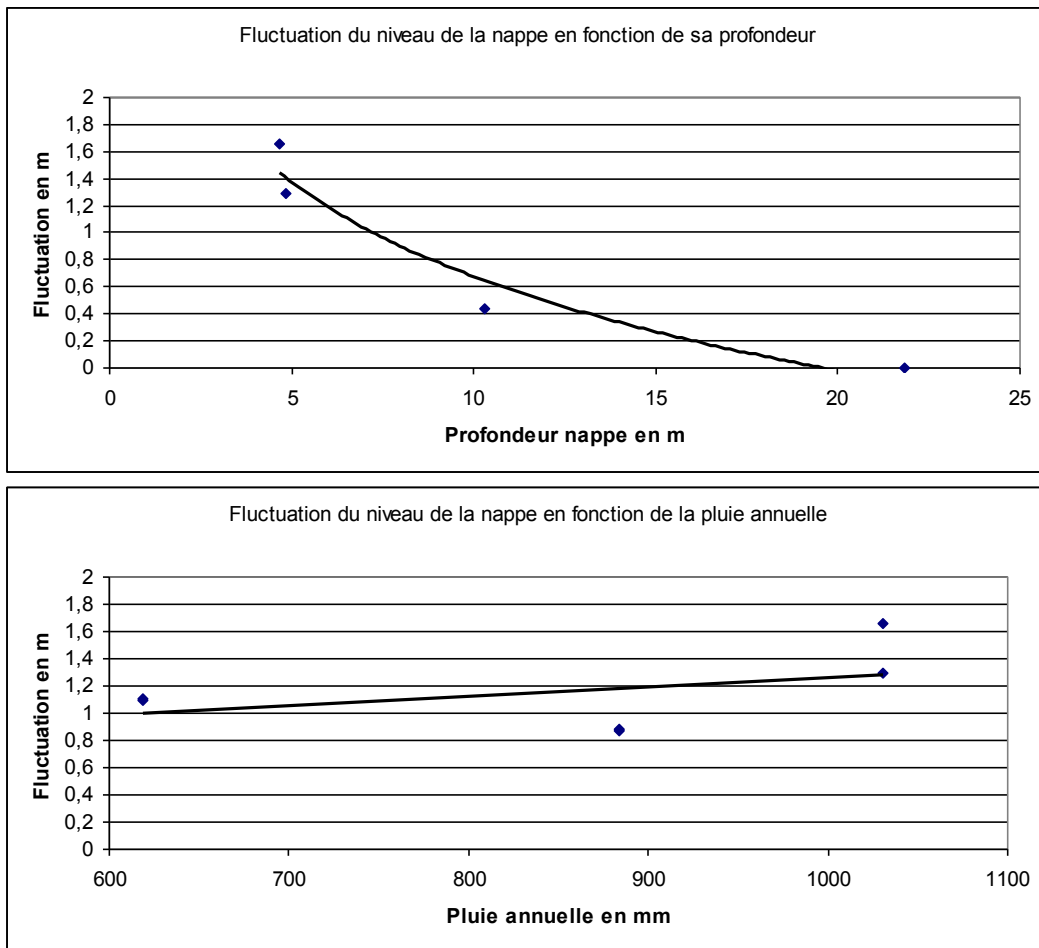


Figure 21 : Etat de la fluctuation de la nappe en fonction de la profondeur et de la pluie

La connaissance du coefficient d'emmagasinement de cette nappe permet de faire une évaluation des réserves renouvelables totales de cette nappe dans la zone de l'étude dont l'étendue est de l'ordre de 600km² en fonction du niveau de fluctuation de la nappe.

Tableau 15 : Réserves renouvelables

Evaluation des réserves renouvelables pour un coefficient d'emmagasinement 2%			
fluctuation en m	lame infiltrée en mm	surface zone étude en km2	Réserve renouvelable en m3
1	20	600	12 000 000
1,5	30	600	18 000 000
2	40	600	24 000 000
2,5	50	600	30 000 000
3	60	600	36 000 000

2.7 Fonctionnement du système aquifère et modèle conceptuel

Les résultats des différentes synthèses des données et investigations menées dans le cadre de cette mission ont permis de mettre en évidence le nombre relativement faible d'ouvrages hydrauliques dans la zone de l'étude. Par ailleurs presque tous ces ouvrages captent la première nappe de surface qui est celle du Continental Terminal. Ainsi les caractéristiques des autres nappes présentes dans la zone de l'étude (Oligo-miocène et Maastrichtien) ont pu être déterminées à partir des résultats des études antérieures et des travaux de prospection géophysiques menés dans le cadre de cette mission. Ces investigations ont aussi permis de mettre en évidence :

- l'épaisseur relativement importante de la couche de séparation imperméable entre les nappes de l'Oligo-miocène et du Maastrichtien (de l'ordre de 300m) et celle entre le Continental Terminal et l'Oligo-miocène bien plus faible (de l'ordre d'une centaine de mètres) ;
- et le fait que la nappe de l'Oligo-miocène soit par endroit constituée par au moins deux niveau sableux argileux séparés par une couche argileuse relativement mince.

Cette configuration permet en définitive de retenir les éléments suivants pour le modèle conceptuel :

- la communication hydraulique entre les nappes de l'Oligo-miocène et du Maastrichtien serait relativement mauvaise du fait de la forte couche imperméable qui les sépare ;
- de même entre les nappes du Continental Terminal et de l'Oligo-miocène, on peut considérer que la communication hydraulique n'est pas bonne à cause de l'épaisseur de la couche imperméable les séparant (de l'ordre de 80 à 100m) ;
- ainsi on peut dans un premier temps considérer un système aquifère comprenant uniquement la nappe du Continental Terminal ;

Les conditions d'alimentation de ce système aquifère pourraient se résumer comme suit :

- une alimentation généralisée dans l'espace par les pluies dont l'intensité varie principalement en fonction de la pluviométrie et dans une moindre mesure en fonction de la profondeur du niveau de la nappe ;
- une alimentation préférentielle au droit des cours d'eau dont la relation pourra être prise en compte dans la conception du modèle comme une condition aux limites particulières.

2.8 Construction et exploitation du modèle de simulation

2.8.1 Logiciel de modélisation

Le modèle a été réalisé avec l'interface Visual Modflow version 2011 qui utilise le code de calcul Modflow développé en Fortran par l'USGS (McDonald & Harbaugh, 1988). Ce code de calcul permet de résoudre l'équation de diffusivité aux dérivées partielles des écoulements par une combinaison de l'équation de continuité et de la loi de Darcy.

C'est un programme structuré en modules indépendants qui permet de modifier facilement ou d'adapter le code pour une application particulière. Le programme Modflow peut simuler les écoulements en régime permanent ou transitoire d'un système de géométrie non uniforme, pouvant comporter des couches confinées, libres ou les deux à la fois. Les débits d'échange avec l'extérieur tels que les pompages, la recharge, l'évaporation, le drainage d'un lit d'un cours d'eau peuvent être simulés. Les champs de perméabilité, de transmissivité et de coefficient d'emmagasinement peuvent varier spatialement suivant l'anisotropie du système et par conséquent être distribués dans le domaine du modèle. Les conditions aux limites de charges imposées (Dirichlet), de flux imposés (Neuman) et de conditions mixtes (Cauchy), peuvent être simulées aussi bien aux limites externes du système qu'à l'intérieur de celui-ci. Ces conditions aux limites permettent l'échange de flux du domaine à modéliser avec l'extérieur.

L'équation d'écoulement est résolue en utilisant l'approximation par différences finies. Ainsi le domaine d'étude est subdivisé en blocs où les propriétés hydrauliques sont moyennées au niveau de chaque bloc. L'équation d'écoulement est ainsi résolue pour chaque cellule en utilisant les cellules voisines.

Les données d'entrée du modèle sont relativement simples. Il s'agit ici de fournir au modèle les conditions initiales d'écoulement (champ initial de charges hydrauliques), les propriétés hydrauliques (perméabilité, coefficient d'emmagasinement), les propriétés géométriques (toit et mur de l'aquifère), et enfin les différents termes d'échanges que le domaine d'étude présente avec l'extérieur (conditions aux limites, recharge, évaporation, pompages, injection). Ces différents paramètres doivent être distribués au niveau des cellules du modèle.

Les résultats du modèle peuvent être générés soit sous forme cartographique (distribution de la recharge calculée, distribution des rabattements, traçage des particules, distribution de concentrations des polluants) et/ou sous forme de bilan hydrique qui permet de caractériser les différentes contributions du système.

Il faut dire que le programme Modflow est libre d'accès et pour les besoins de ce projet, nous avons utilisé la version commerciale Visual Modflow 2011 de Waterloo Hydrogeology, qui permet une plus grande convivialité dans l'introduction et l'exploitation des données.

La figure 2 présente quelques aspects de l'interface et de calculs que le programme permet.

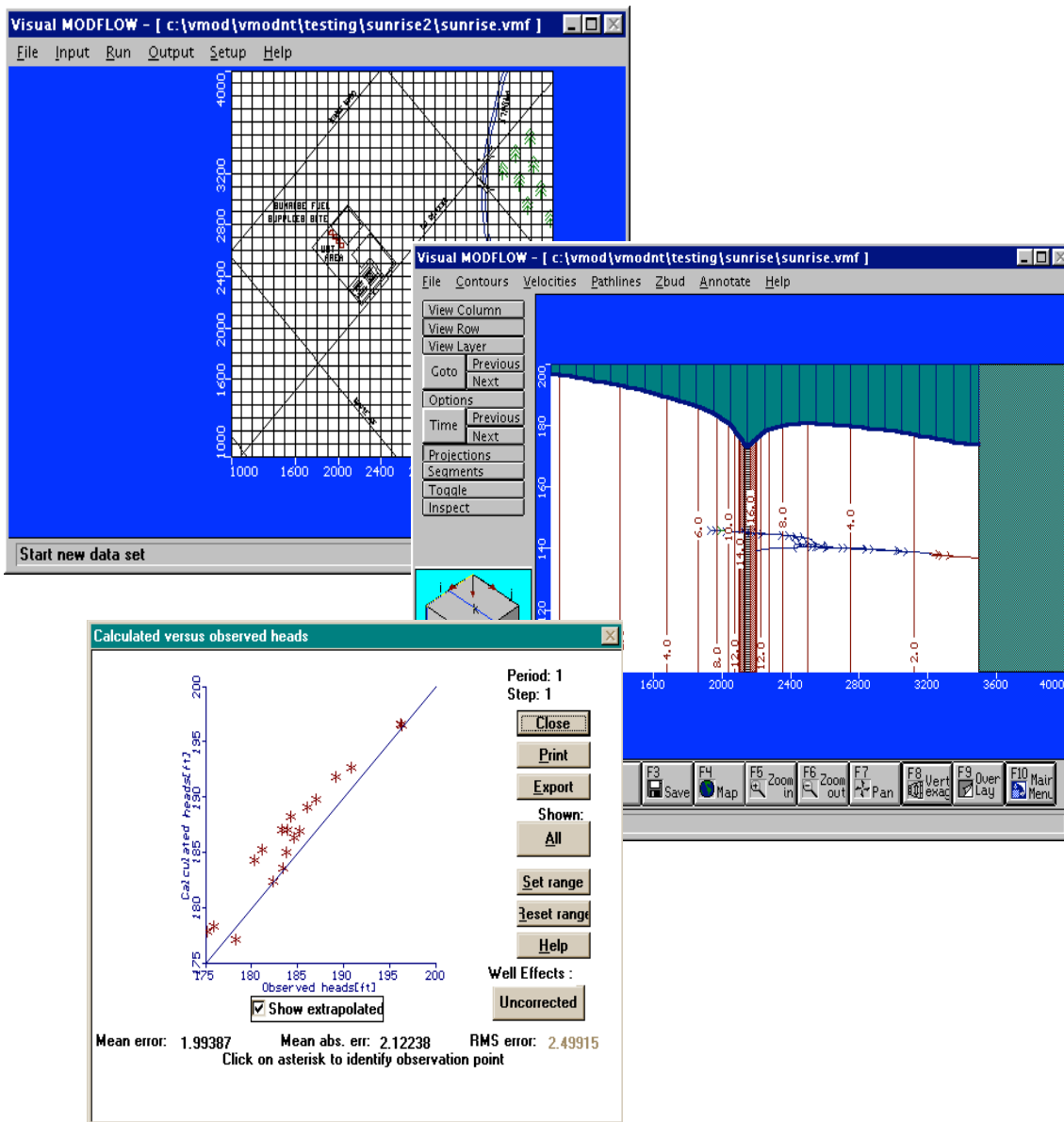


Figure 1 : Interface et présentation du programme Visual Modflow (a/ menu principal, b/ possibilité de visualiser en coupe ; c/ vérification du calage)

2.8.2 Implémentation des données d'entrée

2.8.2.1 Modèle conceptuel et maillage

Suite aux considérations émises dans la présentation de la zone de l'étude, les conditions aux limites qui pourront être appliquées pour la nappe du Continental Terminal sont :

- des limites à niveau constant dans les zones où on note la présence de cours d'eau soit :
 - o au Nord avec le fleuve Casamance ;
 - o à l'Ouest avec le Ourong Bolong et sa jonction avec la Casamance ;
 - o à l'Est avec le Kamobeul.
- La limite Sud qui correspond à la frontière avec la Guinée Bissau a été repoussée relativement loin de la limite initiale de la zone de l'étude pour qu'elle n'ait pas une incidence particulière
- Des conditions intérieures pour la recharge et les prélèvements opérés au niveau des ouvrages de captage inventoriés.

Le maillage a été conçu en mailles carrées de 500 m de côté (69 rangées et 57 colonnes) (Figure 3) sur l'ensemble de l'extension du modèle. L'aquifère est représenté par une seule couche de

mailles, dont l'épaisseur est définie d'après les données interpolées du rapport R2 de géométrie de l'aquifère du Continental Terminal. La figure 4 suivante présente les épaisseurs de l'aquifère prises en compte dans le modèle.

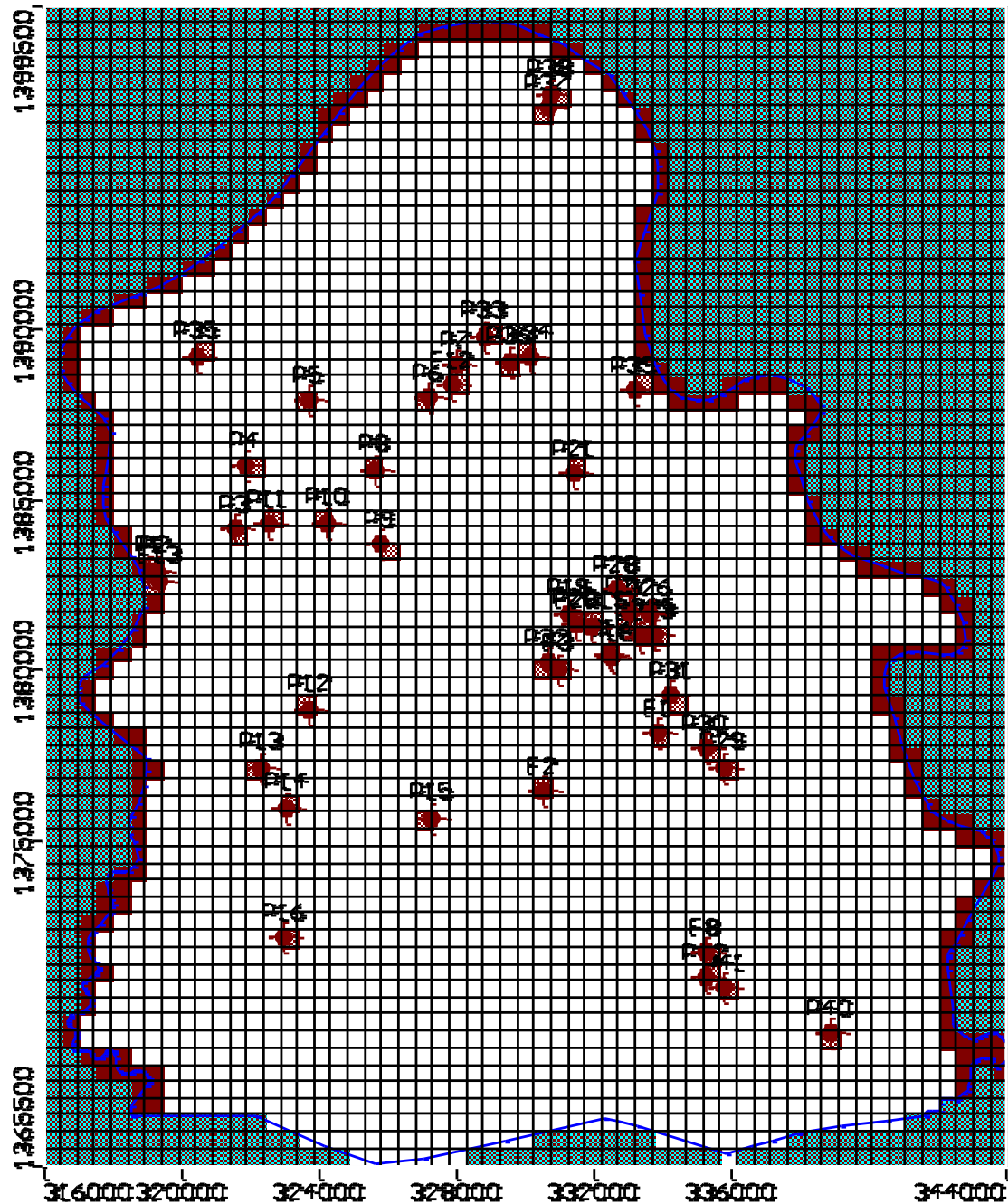


Figure 22 : modèle conceptuel et maillage du domaine d'étude

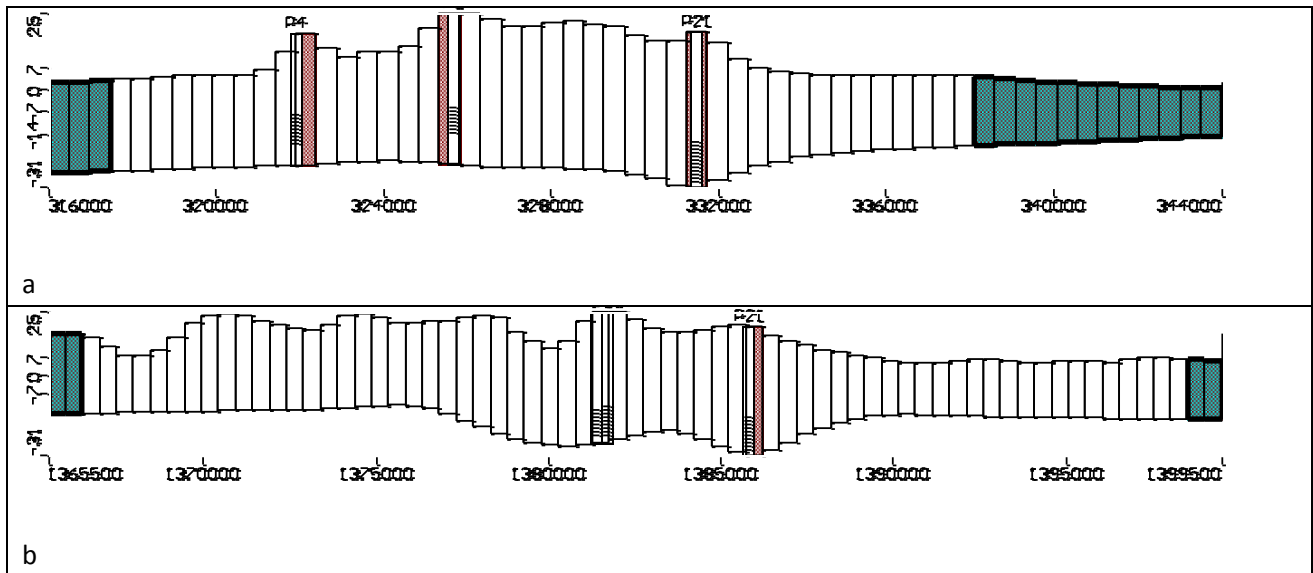


Figure 23: coupe Est-Ouest (a) et Nord-Sud (b) représentant la géométrie

2.8.2.2 Géométrie de l'aquifère

Ces données sont issues des investigations géophysiques, de topographiques pour définir la configuration géométriques du toit, du mur et de la puissance de l'aquifère. Les données discrètes ont par la suite été extrapolées sur l'ensemble du domaine d'étude en utilisant le programme SURFER selon le maillage de 500m sur 500 m adopté.

En ce qui concerne la topographie, les données ponctuelles des courbes de niveau et des points cotées en plus du nivellement opéré dans le cadre de cette mission ont été utilisées pour générées une carte topographiques représentant le toit de l'aquifère libre du CT. La morphologie du toit comme identifiée dans la partie hydrologie du rapport de synthèse met en évidence la zone de plateau au centre de la région qui culmine de 25 à 30 m à l'exception de la partie Nord qui est plus basse. Au-delà de part et d'autre sur les flancs, la topographie devient de plus en plus basse avec des altitudes de +5m IGN (Figure 23)

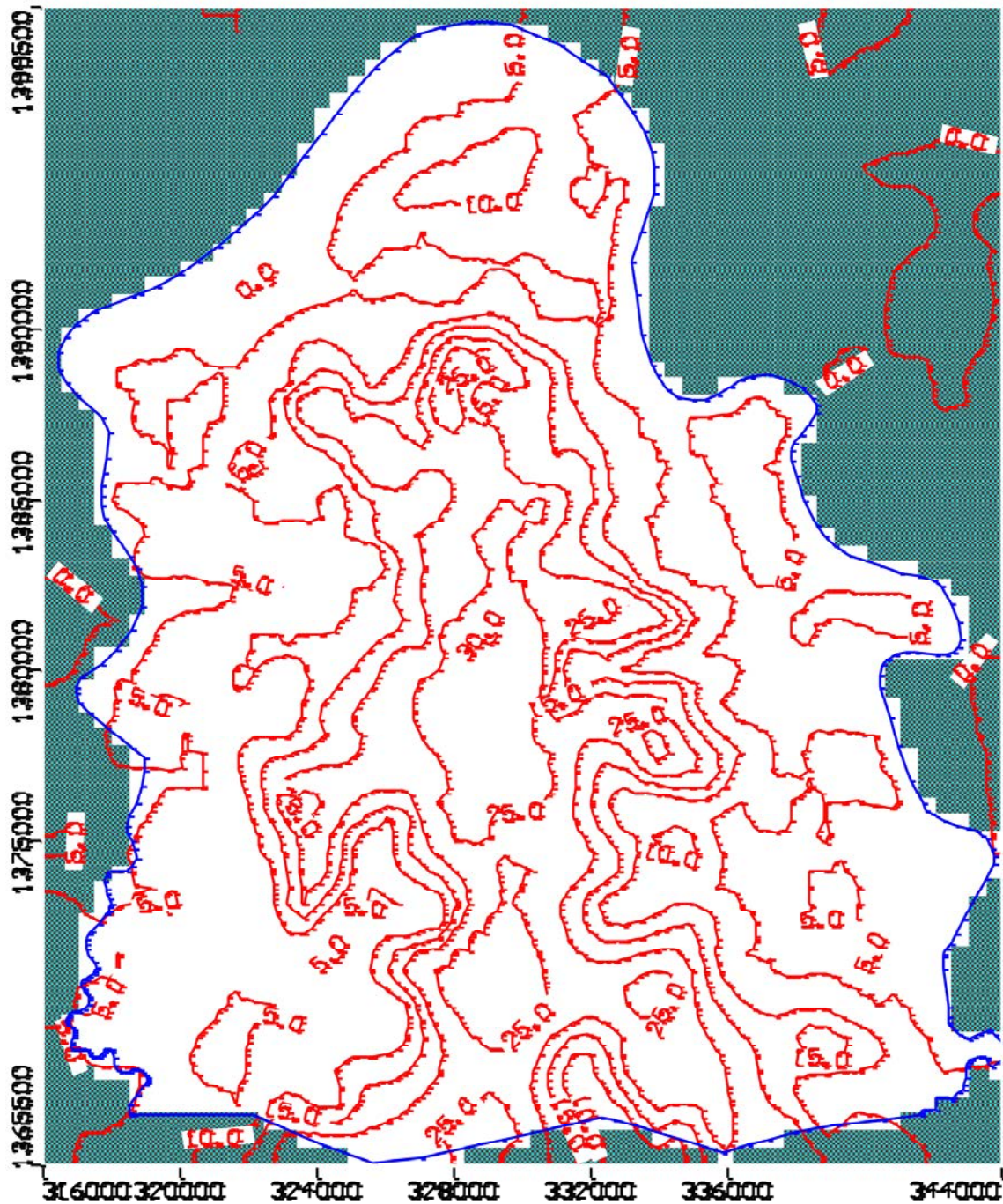


Figure 24: Morphologie du toit de l'aquifère

L'altitude du mur de l'aquifère du CT a été évaluée à partir des données de résistivité de la géophysique. La configuration montre des zones basses entre -25 et 30 m au centre et à l'Ouest à l'exception des parties localisées au Sud Est et à l'extrême Nord Est (Figure 24)

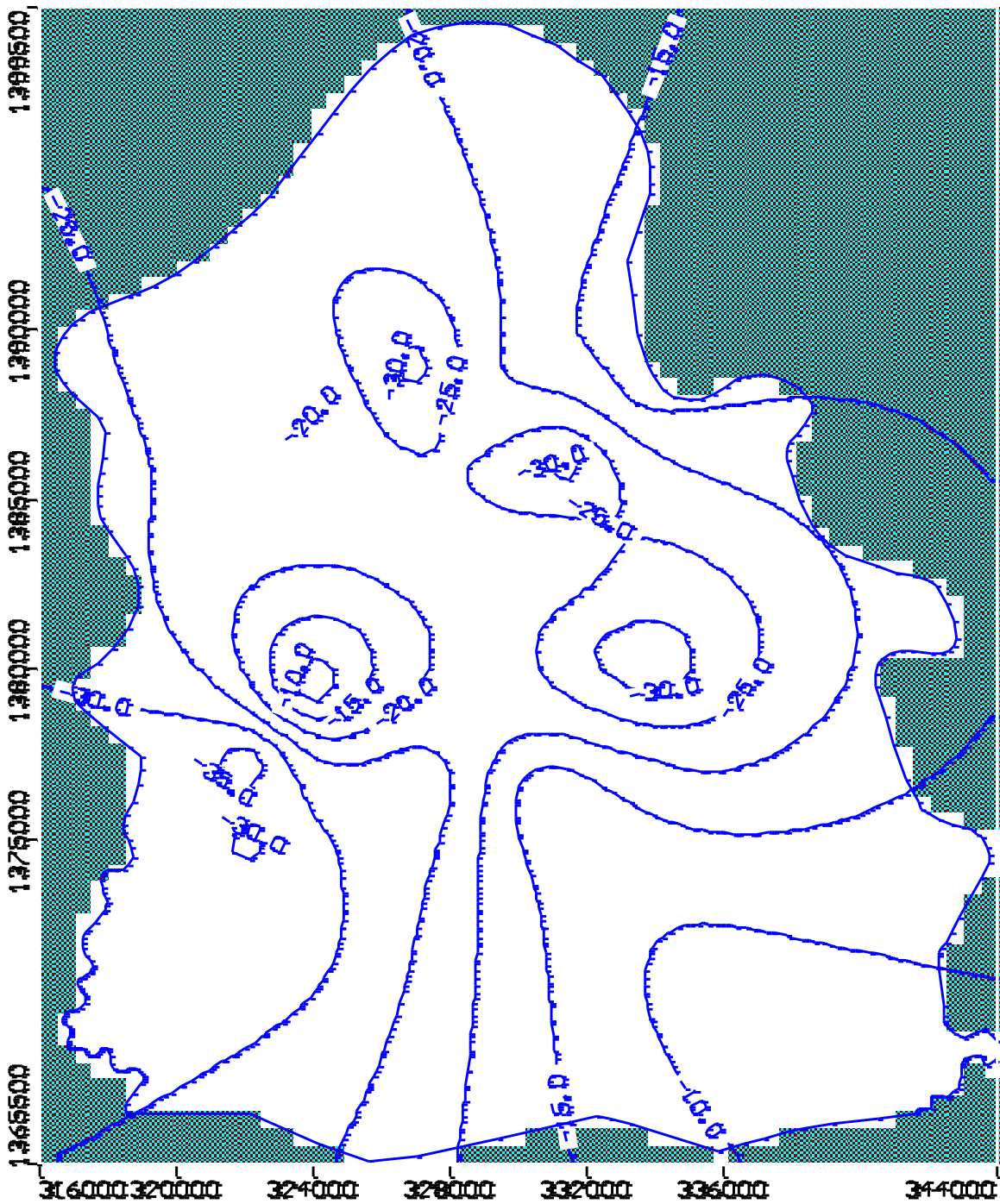


Figure 25: Morphologie du mur de l'aquifère du CT

Les épaisseurs correspondantes sont relativement bonnes dans les parties centrales avec des puissances de l'ordre de 50 m diminuant jusqu'à 10 m à l'extrême Sud Est (Figure 25)

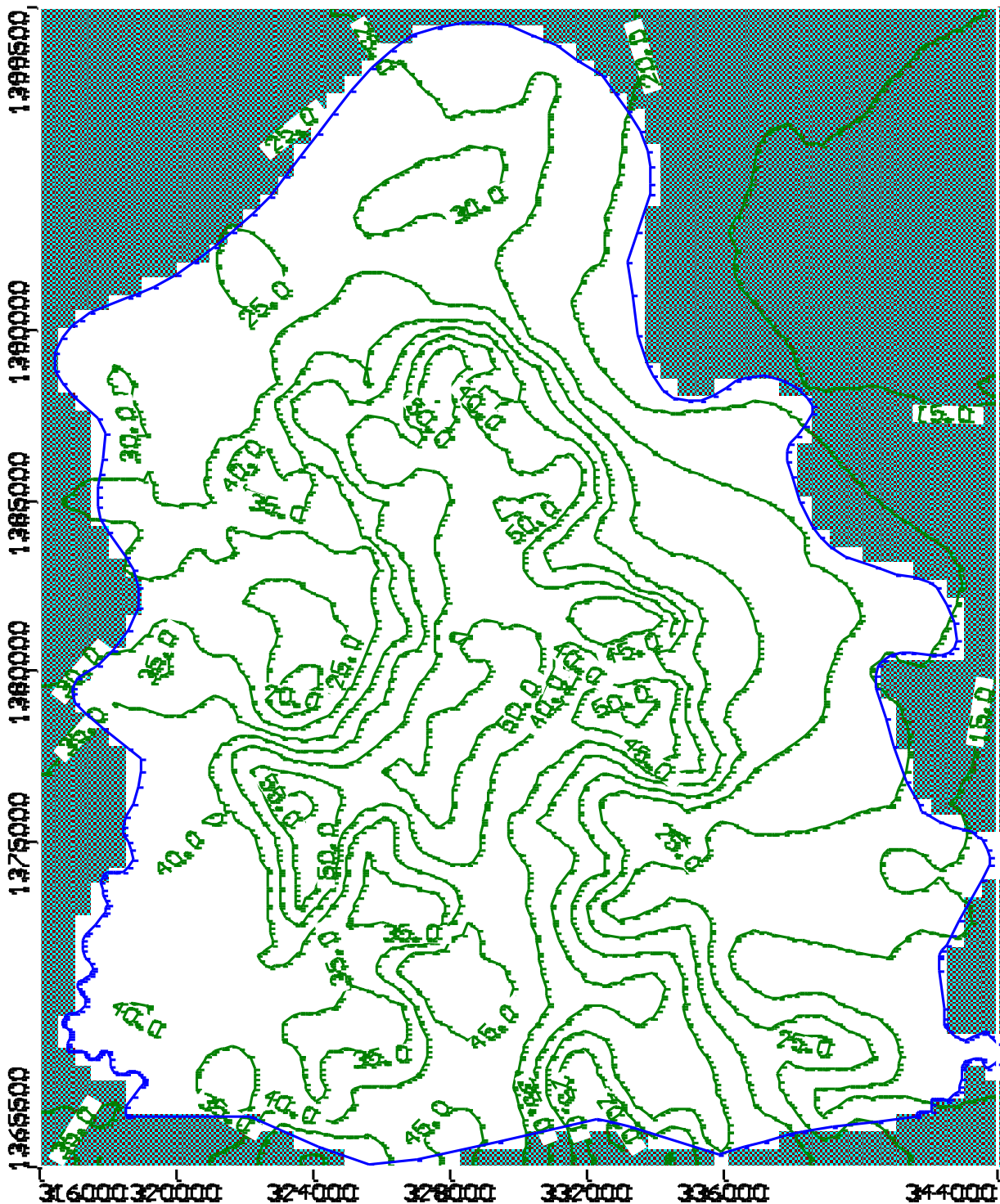


Figure 26 : variation de l'épaisseur de l'aquifère du CT

2.8.2.3 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 issues des enquêtes sur le terrain. Ces données de débits sont relativement incomplètes pour être intégrées dans le modèle. Seul l'ouvrage de la SDE présente des données fiables sur une période de 7 ans avec un niveau de prélèvement moyen de 340 m³/j. Nous nous sommes reportés sur la taille des populations des localités et du bétail en appliquant une consommation de 35 litres par personnes et de 15 litres par tête de bétail pour pouvoir estimer

les prélèvements au niveau des puits qui constituent la majeure partie des ouvrages de captage dans la zone du projet.

Les débits de pompage imposés correspondent aux débits moyens journaliers d'exploitation en m³/jour.

2.8.2.4 Régime hydrodynamique

En l'absence de suivi piézométrique continu au cours du temps, le modèle sera calé en régime hydrodynamique permanent en utilisant l'état de l'écoulement en période d'étiage qui est plus représentatif. 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.

2.8.2.5 Données aux limites

Comme énoncé plus haut, pour les limites Nord, Ouest et Est nous avons appliqué une charge imposée de zéro correspondant au niveau de la mer. Ce choix peut bien prévaloir, si l'on tient compte de l'incursion saline dans les bolons et le fleuve Casamance. Par contre pour la partie Sud nous avons repoussé jusqu'à la frontière de Guinée Bissau pour imposer une condition aux limites de flux nul qui peut bien se justifier par l'écoulement qui est divergent à partir du dôme et qui est parallèle à la frontière.

2.8.2.6 Paramètres hydrauliques

Seules les valeurs de transmissivités de la nappe du Continental terminal, mesurées à partir d'essais de pompage réalisés à l'occasion des réceptions de forages déjà indiquées dans la partie relative aux résultats des investigations hydrogéologiques sont prises en compte. Les autres paramètres hydrauliques feront l'objet de calage avec le modèle.

2.8.2.6 Données piézométriques

Les données piézométriques ont été calculées à partir des valeurs de NS et des cotes topographiques mesurées par nivellement des points. Ces données ont déjà été présentées dans la partie du rapport traitant des résultats des investigations hydrogéologiques. Elles permettent de définir le type et le régime d'écoulement de la nappe du CT.

Les valeurs à l'étiage ont été introduites comme données pour évaluer le calage du modèle tandis que les données de battement de nappe ont servi pour évaluer la recharge de la nappe. Il faut signaler que ces données prises au niveau des puits ne peuvent représenter l'état stationnaire de la nappe puisque tous les ouvrages ont été en exploitation et ceci pourrait bien biaiser les résultats sur le mode d'écoulement.

2.8.2.6 Données de recharge

Ces données ont été évaluées sur la base des battements de nappe observés entre l'étiage et la période des hautes eaux. Nous avons appliqué la formule $R = S_y \cdot dH/dt$ où

- R représente la recharge
- S_y la porosité efficace
- dH/dt la variation de la piézométrie entre l'étiage et la période des hautes eaux

Cette équation donne un ordre de grandeur de la recharge qui est de 25 mm/an au maximum. Cette dernière sera la base de départ lors de la phase de calage.

2.8.3 Calage du modèle (données de calage (piézométriques étiage 2017, perméabilités), résultats obtenus : (piézométrie simulée, écart avec valeurs mesurées, bilan hydrodynamique)

2.8.3.1 Données de calage

Les données de calage sont constituées par les mesures piézométriques de la campagne de juin 2017. 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 2017 aux valeurs de charges piézométriques simulées par le modèle aux mailles où sont situés les piézomètres.

2.8.3.2 Répartition des perméabilités calées

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

Figure 27 : Répartition spatiale des perméabilités

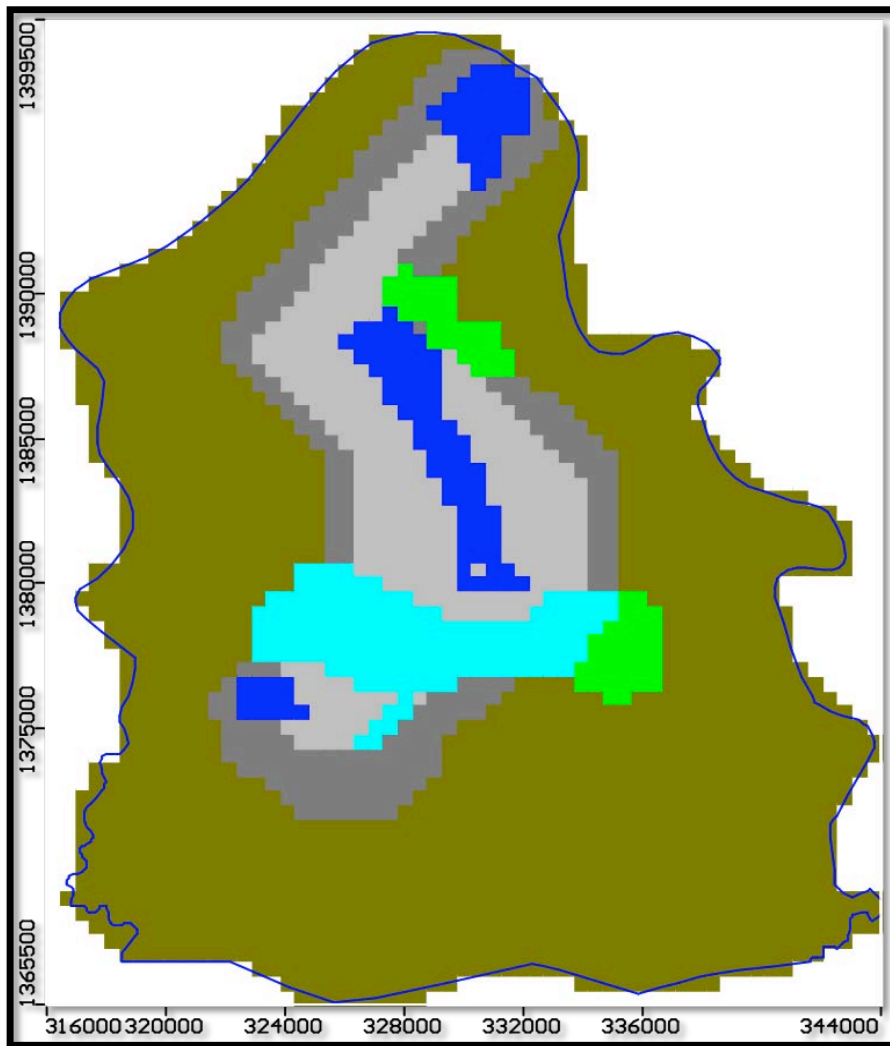


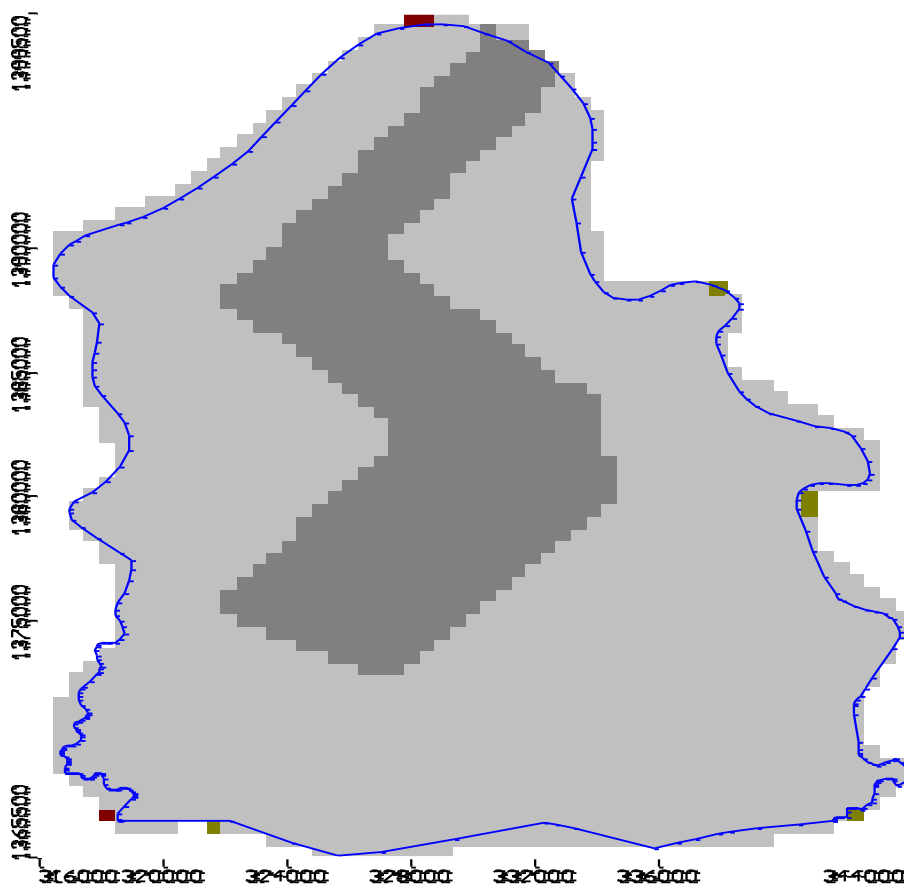
Tableau 16: Répartition des perméabilités calées dans le modèle Visual Modflow.

plage	Valeurs K en m/s
Gris clair	2.10^{-4}
Gris foncé	3.10^{-5}
Bleu foncé	5.10^{-4}
Bleu ciel	5.10^{-4}
Vert	10^{-6}
Vert olive	2.10^{-4}

Les valeurs calées sont comprises entre 10^{-6} m/s et 5.10^{-4} m/s, les perméabilités les plus faibles se trouvant au pourtour du dôme pour le maintenir et les valeurs de 2.10^{-4} m/s de bonne perméabilité de sable permettent un écoulement plus facile suivant un très faible gradient hydraulique vers les limites du modèle. Ces valeurs sont cohérentes avec celles déduites de pompes d'essai dans l'aquifère du Continental Terminal.

2.8.3.3 Répartition de la recharge

La répartition de la recharge calée respecte un gradient d'écoulement du système avec un taux de 15 mm/an dans la partie centrale et un taux de 8 mm/an sur les flancs de l'écoulement. Ce choix imposé de ce paramètre peut bien se justifier si l'on tient compte de la topographie et sur des valeurs fortes de ruissellement dans la région. La carte suivante présente la répartition des zones de recharges homogènes dans le modèle, et le tableau suivant présente les valeurs de recharge associées pour chaque zone.

**Figure 29 : Répartition des zones de recharge sur l'extension du modèle Visual Modflow.**

Valeurs de recharge annuelle calées dans le modèle Visual Modflow.

Zone de recharge	Recharge annuelle (mm/an)
gris foncé	15
Gris clair	8

2.8.4 Résultats du calage

2.8.4.1 Piézométrie

La figure 13 suivante présente la piézométrie simulée sur l'ensemble du modèle, ainsi que les points de mesures avec les charges observées en juin 2017.

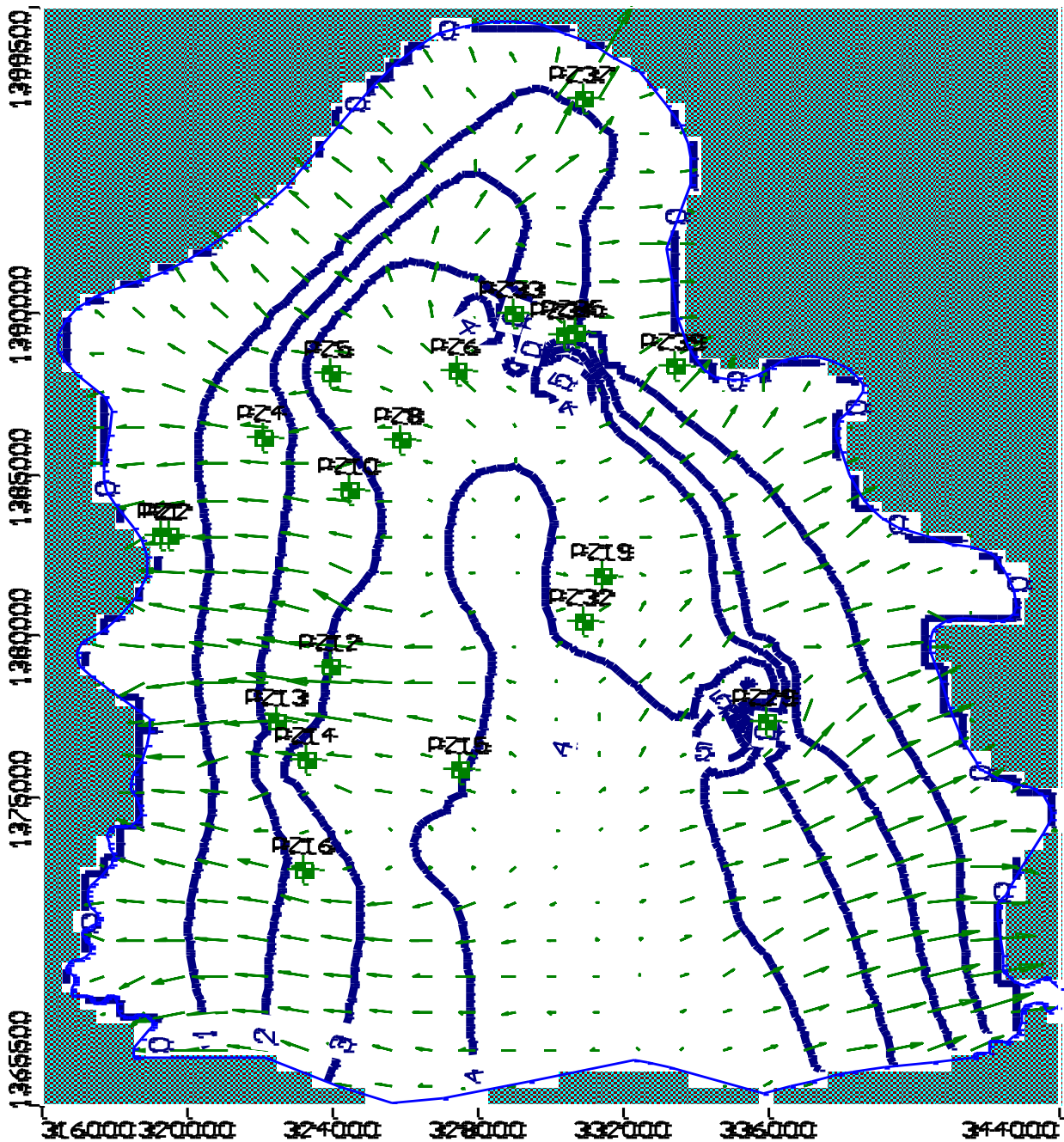


Figure 30 : Niveaux piézométriques simulés par le modèle Visual Modflow et niveaux piézométriques mesurés aux points d'observation.

Les indicateurs statistiques de calage témoignent de la bonne représentativité du modèle avec des différences de valeurs mesurées et calculées par le modèle qui sont en moyenne de 1.2 sur 21 ouvrages d'observation. Cette différence peut bien être acceptable dans la mesure où les données de terrain sont biaisées car les mesures ont été effectuées sur des ouvrages en exploitation

L'écart moyen entre charges simulées et charges observées est de 1,22 m, alors que l'écart absolu moyen est de 1,27 m. Ces valeurs traduisent une tendance globale à la surestimation des niveaux et un calage de qualité moyenne, cependant ces résultats apparaissent tout à fait satisfaisants au regard de la variabilité spatiale des niveaux mesurés et des gradients piézométriques observés. Il faut souligner que les ouvrages de référence pour le calage sont constitués en majorité de puits villageois qui sont en exploitation au moment de la mesure de niveau statique.

De plus la carte de la figure 8 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 où la vitesse maximale de l'écoulement est estimée à 1,5.10⁻⁶m/s.

2.8.4.2 Bilan hydrodynamique

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

Tableau 10 : Termes du bilan hydrodynamique du modèle Visual Modflow calé.

Terme du bilan	Entrée d'eau (m ³ /jour)	Sortie d'eau (m ³ /jour)
Charges imposées	0	14418
Prélèvements	0	1880
recharge	16296	
TOTAL	16296	16298

Les entrées d'eau dans l'aquifère du Continental Terminal modélisé se font quasi-exclusivement par la recharge vu la configuration de l'écoulement qui se fait des plateaux vers les bolons et le fleuve Casamance.

Les sorties d'eau de l'aquifère se font principalement par les limites à charges imposées qui forment le pourtour de l'aquifère sur les côtés Nord, Ouest et Est et les prélèvements qui sont relativement faible vu le nombre d'ouvrages modernes dans la région. 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.

2.8.5 Exploitation du modèle (scénarios, résultats, recommandation pour la mise en place de nouveau champ de captage)

2.8.5.1 Définition des scénarios et localisation des nouveaux ouvrages

Une ligne de 8 forages a été prise en compte sur l'axe Nord –Sud de la zone de plateau. Ces nouveaux forages dénommés NF1 à NF8 distants de 3 km au moins les uns par rapport aux autres sont implantés sur l'axe du dôme où les caractéristiques hydrauliques de même que les puissances de l'aquifère (50m) sont meilleures. Ce choix de sites d'implantation se justifie également les altitudes piézométriques hautes dans cette zone permettant d'avoir une bonne épaisseur saturée de l'aquifère mais de la vulnérabilité du système vis-à-vis de l'intrusion saline

sur les flancs de l'écoulement où le gradient hydraulique de même que la charge sont faibles (proche de zéro).

Le régime permanent de pompage de même que les débits appliqués adoptés (volume de pompage du forage SDE à 340 m³/j) représentent le scénario le plus pessimiste permettant de faire une évaluation des potentiels exploitables. Ces objectifs sont des maxima à atteindre pour assurer un transfert d'eau suffisant d'une taille de population qui englobe les communes de Oussouye, Djimbering, Santhiaba Manjacque, Mlomp et Oukouk. Le nombre de forages et les débits ont été calculés sur la base des tailles des populations qui sont à Oussouye 4135 habitants, Djimbering à 12165, Santhiaba Manjacque à 1870, Mlomp à 10939 et Oukout à 8057 habitants. Les débits unitaires pour chaque nouveau forage est calé sur celui du forage F2 SDE qui est à 340 m³/j.

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.

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.

La figure suivante présente la localisation des forages et puits anciens et les nouveaux forages NF

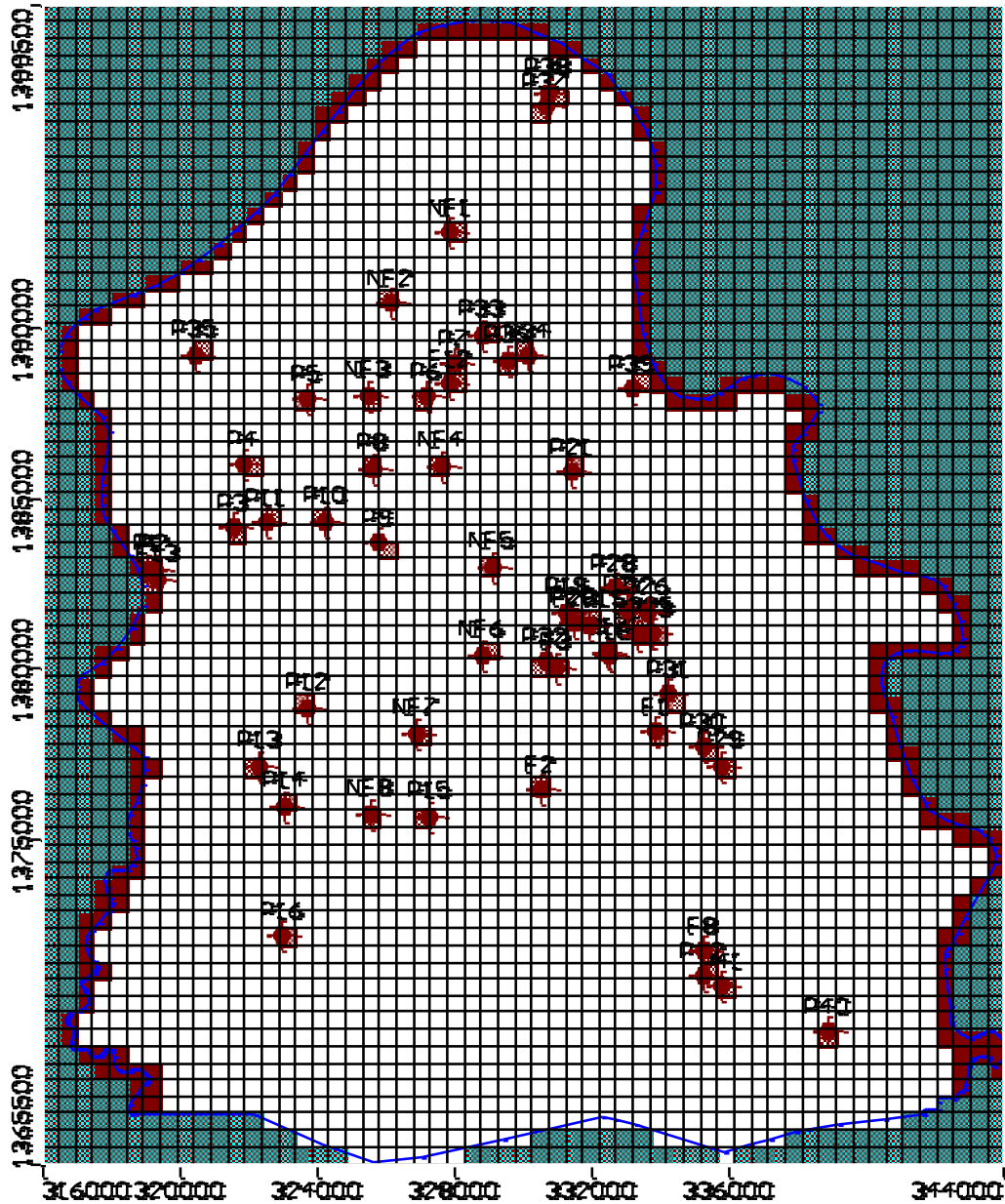


Figure 31 : position des nouveaux forages NF

2.8.5.2 Résultats de la simulation

Le seul scénario adopté prend en compte les pompages des anciens et nouveaux forages NF. Les résultats de simulations montrent bien une baisse de niveau du dôme piézométrique dont les isopièzes ont tendance à migrer vers le Sud et les directions et sens d'écoulement perturbés au niveau du dôme (Figure 15). Par contre partout ailleurs sur les flancs, le régime d'écoulement reste stable montrant que la nappe se vidange vers les limites où elle repousse le biseau salé. Ce type de configuration d'écoulement serait sans danger sur la progression du biseau salé comme le montre les termes du bilan dans le tableau 3.

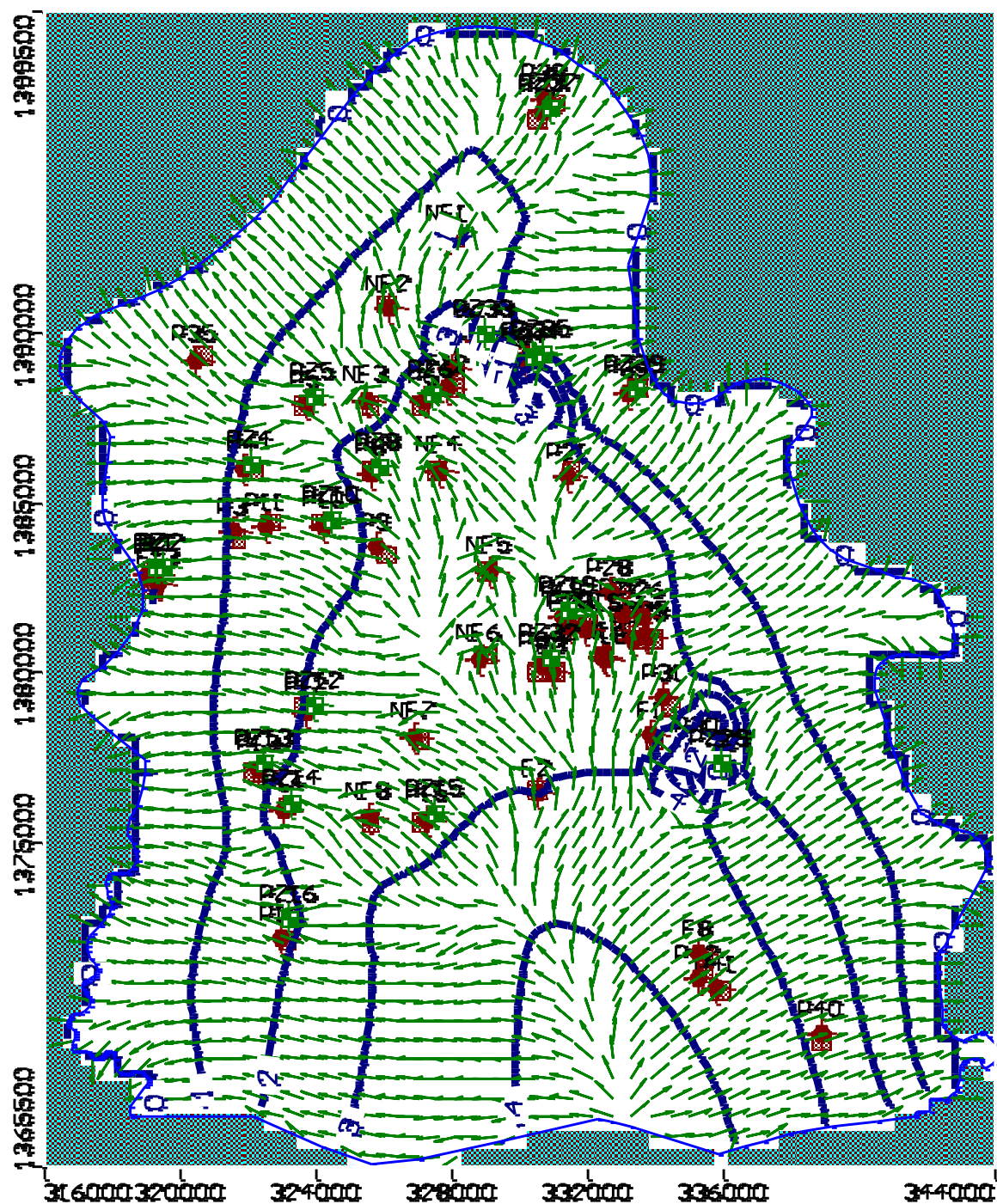


Figure 32 : Piézométrie simulée après nouveaux prélèvement

Tableau 11: termes du bilan après simulation

Terme du bilan	Entrée d'eau (m ³ /jour)	Sortie d'eau (m ³ /jour)
Charges imposées	0	11695
Prélèvements	0	4600
recharge	16297	
TOTAL	16297	16295

2.8.5.3 Recommandations pour la mise en place de nouveaux champs captant dans l'aquifère Continental Terminal du Plateau d'Oussouye

Le travail de modélisation présenté dans ce rapport a permis de tester un seul scénario d'exploitation de l'aquifère du Continental Terminal avec la création de 8 nouveaux forages sur l'axe du plateau d'Oussouye. Le modèle construit s'est montré capable de reproduire les observations de niveaux piézométriques correctement, cependant les limitations suivantes doivent être soulignées :

- Les données de calage du modèle (piézométrie) sont peu nombreuses et ne permettent pas d'effectuer un calage en régime transitoire. Pour cette raison une incertitude élevée subsiste sur les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère, et l'acquisition de nouvelles données piézométriques plus complète avec un suivi mensuel permettrait de réduire cette limitation.
- Par ailleurs, le modèle permet d'évaluer la disponibilité de la ressource dans les secteurs d'intérêt, mais ne présage en rien des capacités des ouvrages de captage à exploiter cette ressource. Les débits accessibles par ces ouvrages seront dépendants à la fois des propriétés locales de l'aquifère, et des caractéristiques des ouvrages de captage qui peuvent être plus ou moins bien conçus.

Pour ces raisons les recommandations suivantes peuvent être 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 dans les zones identifiées de même dans les zones à risque de dégradation de la qualité de l'eau.
- Les propriétés locales de l'aquifère lors de l'implantation de nouveaux forages d'exploitation doivent être évaluées grâce à la réalisation de pompages d'essais de longue durée, afin de s'assurer de la productivité réelle des ouvrages. Ces essais feront suite aux pompages d'essai par paliers permettant d'évaluer les débits caractéristiques des ouvrages et d'en déduire des débits moyens d'exploitation.

3. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Les principales conclusions et recommandations qui peuvent être tirées de cette sont :

- le niveau d'informations relatives à la nappe de l'Oligo-miocène est relativement faible. Elle se justifie par le nombre faible d'ouvrage captant cette nappe (un seul) et les moyens d'investigation prévus dans cette mission relativement limités (géophysique électrique seule) ;
- pour combler cette lacune, il serait bon d'envisager des investigations complémentaires de la nappe de l'Oligo-miocène (géophysique plus lourde et plus appropriée et quelques sondages mécaniques avec des essais de pompage de longue durée comprenant des piézomètres de suivi ;
- les cours d'eau de surface de la zone en dehors de la Casamance n'ont pas fait l'objet d'études conséquentes et suivi limnimétriques ; ce handicap a pu être surmonté par des investigations climatiques et hydrologiques qui ont permis d'arriver à un bon niveau de connaissance des ressources en eau de surface ;
- les potentialités relativement plus intéressantes de la nappe du Continental Terminal dans sa partie centrale ont été prouvées au cours des différentes phases de l'étude ;
- la bonne qualité de l'eau de la nappe du Continental Terminal a aussi été prouvée ;
- la qualité de l'eau de la nappe du Continental Terminal est nuancée par la présence de teneur en fer élevée par endroit et une salinité élevée au niveau de deux points d'observation parmi près d'une trentaine ;
- les résultats de la modélisation ont permis d'évaluer les ressources renouvelables par la recharge par les pluies à 16296 m³/jour ;
- les prélèvements des puits et forages actuels et aussi de 8 autres nouveaux forages ne font que 4600 m³/jour ce qui prouve les bonnes capacités de cette nappe par rapports aux besoins actuels et même futurs.
- Ces potentialités devront être confirmées par des travaux de sondages et pompages d'essai lors de la création. Forages ;
- 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 et au lisière avec les bolongs et le fleuve Casamance pour la progression de l'intrusion saline.

BIBLIOGRAPHIE

- Etude hydrogéologique Casamance 1978-80. Volume 1 Rapport général Kruger I. (1980)
- Synthèse hydrogéologique du bassin sédimentaire de la Casamance Vol 1 et 2 + annexes par J le Priol DEH 1983
- Alimentation en eau de Ziguinchor (Casamance) - Réalisation de deux forages de reconnaissance complémentaire à l'Est à Fanda et Sindone – Rapport de synthèse Ministère de l'Hydraulique Direction des Etudes Hydrauliques Juin 1983
- Synthèse hydrogéologique du Sénégal Etude géologique structurale par photo interprétation Géométrie et limites des aquifères souterrains DEH 1985 ;
- Etude des ressources en eau souterraine du Sénégal - Campagne de prospection géophysique BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES juin 1987
- Etude hydrogéologique de la nappe profonde du Maastrichtien : Document de travail n° 03 Synthèse des données géologiques et structurales Application à la définition des systèmes aquifères COWI-POLYCONSULT Février 2001
- Rapport d'exécution des forages de Oussouye F2 et F3, Oukout, Mlomp, Louldia Ouolof, Pointe St Georges, Kafoutine (sondage profond)