



**CARACTERISATION HYDROGEOLOGIQUE DES AQUIFERES DU
CONTINENTAL TERMINAL ET DE L'OLIGO-MIOCENE DANS LA ZONE
TAMBACOUNDA-KAFFRINE (SENEGAL)**

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME D'INGENIEUR 2iE AVEC GRADE DE
MASTER

SPECIALITE : GENIE CIVIL ET HYDRAULIQUE

Présenté et soutenu publiquement le 24 Janvier 2020 par :

Serigne Ahmadou Bamba MAR

(2016 0472)

**Directeur de mémoire et encadrant 2iE : Dr Mahamadou KOÏTA, Maître de Conférences,
enseignant-chercheur en Hydrogéologie**

**Encadrant externe : Dr Hamma Fabien YONLI, Assistant, Université de Fada N'Gourma,
(UFDG)**

Maitre de stage : Abdoulaye CISSE, Ingénieur hydrogéologue, (DGP/MEA)

Structure d'accueil du stage : DGP/MEA

Jury d'évaluation :

Pr. Igor OUEDRAOGO 2iE (Président de jury)

Dr. Elie SAURET CNRS (Evalueur)

Dr. Angelbert BIAOU 2iE (Evalueur)

Pr. Mahamadou KOITA 2iE (Encadreur)

Dr. Hamma Fabien YONLI UFDG (Encadreur)

Promotion [2019 / 2020]

Dédicaces

Je dédie ce mémoire :

A mon père Aly MAR,

A ma mère Faty KONTEYE,

A mes frères et sœurs,

A mes amis et camarades,

A mes cousins et cousines,

A l'ensemble de mes professeurs,

A toute personne qui a contribué à ce travail.

CITATIONS

“Ô vous les jeunes ne vous préoccupez que de la droiture et de la recherche de savoir.”

Cheikh Ahmadou Bamba in *Tazawudu ciqar (Le viatique des jeunes)*.

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, mes remerciements vont à l'encontre de l'Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE). En ces termes, mes pensées vont à l'endroit des professeurs pour la formation de qualité qu'ils nous ont transmis mais aussi au personnel administratif pour leur implication bénéfique dans notre formation.

Je tiens à remercier Dr. KOITA Mahamadou pour avoir accepté de diriger ce travail. Malgré son lourd emploi du temps, il n'a ménagé aucun effort pour le bon aboutissement de ce travail de par son encadrement et sa disponibilité.

Je remercie mon encadrant externe Dr. YONLI Hamma Fabien pour sa disponibilité, ses conseils et l'appui scientifique qu'il a apporté à ce travail.

Je tiens également à remercier l'ensemble du personnel de la DGPRE sans exception, ils ont été pour moi source de motivation ce qui a énormément pesé pour le bon déroulement de mon stage.

J'exprime ma profonde gratitude à mon maître de stage, M. CISSE Abdoulaye ingénieur hydrogéologue pour sa disponibilité et ses conseils tout le long de mon séjour à la DGPRE.

Je remercie chaleureusement M. FALL Mouhamadou Doudou, chef de la division hydrogéologie à la DGPRE.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à M. NDOUR Niokhor, Directeur de la DGPRE.

Mes plus sincères remerciements vont à l'encontre de mes parents, mes frères et sœurs mais particulièrement à mon père qui a toujours été présent pour moi, qu'il trouve en ces mots ma profonde reconnaissance.

RESUME

Cette étude a pour objectifs de faire une caractérisation hydrogéologique des aquifères du continental terminal et de l'oligo-miocène. Pour ce faire, une analyse a été effectuée sur les paramètres hydrogéologiques de 172 forages dont 10 ont servi à la piézométrie et sur des données climatiques sur 05 ans. Les résultats de l'analyse statistique des paramètres hydrogéologiques montrent que la moyenne des débits de forages est de 42,29 m³/h et la transmissivité moyenne de 0,024 m²/s. Ce qui met en évidence la forte productivité des aquifères du continental terminal et de l'oligo-miocène. On constate aussi que la productivité des aquifères ne dépend pas seulement de l'épaisseur des altérites. Sur les deux formations géologiques captées (sables et sables argileux) par les forages, les sables sont les plus productifs. Les résultats de la piézométrie ont montré que les charges piézométriques par rapport au niveau de la mer varient entre -25,11 m et 2,43 m durant la période 2013-2018. Les fluctuations piézométriques observées durant cette période indiquent un relèvement de la surface piézométrique de l'oligo-miocène. La méthode du bilan a été utilisée pour estimer la recharge sur différentes stations. Le calcul de l'ETP a été fait par la méthode de Thornthwaite et celui du ruissellement par la méthode de Tixeront-Berkaloff. Il en ressort que les valeurs des recharges sont de 145,88 mm soit 20% des précipitations à la station de Tambacounda, 131,54 mm soit 21% des précipitations à la station de Kounguel et 108,32 mm soit 17% des précipitations à la station de Kaolack.

Mots Clés :

- 1 –Aquifères sédimentaires**
- 2–Piézométrie**
- 3 –Productivité**
- 4 –Recharge**
- 5–Tambacounda.**

ABSTRACT

This study aims to perform a hydrogeological characterization of the aquifers of the continental terminal and the oligo-miocene. To do this, an analysis was performed on the hydrogeological parameters of 172 wells of which 10 were used in the hydraulic head and on climate data 05 years. The results of the statistical analysis of the hydrogeological parameters show that the mean of the drilling flows is 42.29 m³/h and the average transmissivity of 0.024 m²/s. This highlights the high productivity of the aquifers of the continental terminal and oligo-miocene. It is also noted that the productivity of aquifers does not only depend on the thickness of the regolith. On the two geological formations captured (sands and clay sands) by drilling, the sands are the most productive. The results of the piezometry showed that the piezometric levels relative to the sea level range from -25.11 m to 2.43 m during the 2013-2018 period. The piezometric fluctuations observed during this period indicate a rise in the piezometric surface of the oligo-miocene. The balance sheet method was used to estimate recharge at different stations. The calculation of ETP was made by the Thornthwaite method and that of runoff by the Tixeront-Berkaloff method. It shows that the recharge values are 145.88 mm or 20% of the precipitation at the Tambacounda station, 131.54 mm or 21% of the rainfall at the Kounguel station and 108.32 mm or 17% of the precipitation at Kaolack station.

Key Words:

- 1 -Piezometry**
- 2 –Productivity**
- 3 -Recharge**
- 4 – Sedimentary aquifers**
- 5–Tambacounda.**

LISTE DES SIGLES ETABREVIATIONS

- 2iE** : Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement
AIEA : Agence Internationale de l'Energie Atomique
AJCI : Agence Japonaise de Coopération Internationale
ANACIM : Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie
ANSD : Agence Nationale de la Statistique et de la Démographie
BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CIEH : Comité Interafricain d'Etudes Hydrauliques
DGPRE : Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau
EpA : Epaisseur d'altération
ETP : Evapotranspiration Potentielle
ETR : Evapotranspiration Réelle
I : Infiltration
Ns : Niveau statique
OMS : Organisation Mondiale de la Santé
P : Pluviométrie
Pt : Profondeur forage
Q : Débit
Qs : Débit spécifique
R : Recharge
RFU : Réserve Facilement Utilisable
Ru : Ruissellement
T : Transmissivité

Table des matières

I. INTRODUCTION	5
II. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	8
1. Contexte géographique.....	8
2. Climat et facteurs d'influence.....	8
3. Reliefs et Sols.....	10
4. Hydrographie.....	10
5. Contexte géologique.....	10
6. Contexte hydrogéologique.....	11
III. MATERIEL ET METHODES	15
1. Données utilisées.....	15
2. Méthodes.....	15
2.1 Caractérisation hydrodynamique du complexe terminal.....	15
2.1.1 Productivité du complexe terminal.....	15
3. Piézométrie.....	16
3.1 Traitement des données.....	18
3.2 Méthode de réalisation d'une carte piézométrique.....	19
4. Estimation de la recharge.....	20
4.1 Analyse de la variabilité climatique.....	20
4.2 Bilan hydrologique.....	21
4.3 Etude de la variation des saisons climatiques.....	24
5. Etude de la qualité des ressources en eau souterraine	25
IV. RESULTATS ET DISCUSSION	27
1. Caractérisation hydrodynamique.....	27
1.1 Analyse des paramètres de forage et des paramètres hydrodynamiques.....	27
2. Evolution de la piézométrie.....	29
2.1 Evolution de la piézométrie pour la période 2013-2018.....	29
2.2 Description des cartes piézométriques.....	30
2.3 Evolution de la piézométrie en fonction du temps.....	34
3. Estimation de la recharge.....	35
3.1 Analyse de la variabilité climatique.....	35
3.2 Bilan hydrologique.....	36

3.3 Etude de la variation des saisons climatiques.....	36
3.4 Analyse du bilan hydrologique.....	37
4. Etude de la qualité des ressources en eau	41
4.1 Le potentiel hydrogène	41
4.2 La température.....	41
4.3 La conductivité électrique	41
4.4 Distribution des éléments chimiques.....	42
4.5 Les faciès chimiques des eaux.....	44
V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	46
VI. BIBLIOGRAPHIE	48
ANNEXES	52

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I: Classification des débits selon CIEH.....	16
Tableau II: Classification des transmissivités selon CIEH	16
Tableau III: Classification des débits spécifiques selon CIEH	16
Tableau IV: Statistique élémentaire des paramètres de forage.	27
Tableau V Paramètres du test de Pettitt.:	36
Tableau VI: Bilan hydrologique de la station de Tambacounda (2013-2017).	37
Tableau VII: Bilan hydrologique de la station de Kounghel (2013-2017).	38
Tableau VIII: Bilan hydrologique de la station de Kaolack (2013-2017).	38
Tableau IX: Résumé des bilans hydrologiques dans les stations de Tambacounda, Kounghel et Kaolack (2013-2017).	39
Tableau X: Résultats de calcul de la recharge.	40
Tableau XI: Résultats de l'analyse statistique des paramètres physico-chimique de la nappe de l'oligo-miocène.	42
Tableau XII: Résultats de l'analyse statistique des paramètres physico-chimiques de la nappe du continental-terminal.	42
Tableau XIII: Résultat de l'analyse statistique des paramètres chimiques de l'oligo-miocène.	43
Tableau XIV: Résultats de l'analyse statistique des paramètres chimiques du continental- terminal.	43

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Localisation de la zone d'étude	8
Figure 2: Carte de translation des isohyètes pendant la sécheresse au Sénégal	9
Figure 3: Carte Géo-lithologique du Sénégal.....	11
Figure 4: Carte hydrogéologique Tambacounda-Kaffrine	13
Figure 5: Détermination de la charge piézométrique.	17
Figure 6: Localisation des ouvrages de suivi dans la zone d'étude Tambacounda-Kaffrine.....	19
Figure 7: a) Fréquence des débits spécifiques par classe ; b) Fréquence des débits d'exploitation par classe.	29
Figure 8: Courbes d'évolution temporelle de la piézométrie de la nappe oligo-miocène entre 2013 et 2018.	30
Figure 9: Cartes piézométriques a) période étiage 2017; b) période recharge 2017.....	33
Figure 10: a) Evolution temporelle du niveau piézométrique dans le dôme,.....	35
Figure 11: Courbe de la série pluviométrique (Kaffrine), (1981-2017).....	36
Figure 12: Evolution de l'ETP et de l'ETR dans les régions de Tambacounda et Kaolack (2013-2017).....	37
Figure 13: représentation des faciès hydrochimiques des eaux des nappes oligo-miocène et continental terminal dans les régions de Tambacounda Kaffrine (crue, 2017).....	45

I. INTRODUCTION

Les pays d'Afrique Sahélienne tels que le Sénégal connaissent depuis une dizaine d'années, des dérèglements chroniques du climat qui menacent sévèrement la disponibilité des ressources en eau. Ces dernières années ont été marquées par les sécheresses récurrentes des années 1970, 1980, 1990 au cours desquelles les précipitations ont diminué d'environ 40% (Mahé et al., 1991), (Gachon et al., 2010). Au centre du pays, sous-alimenté par les précipitations, les aquifères sont profondément déprimés et la désertification progresse dans les zones les plus défavorisées (UNICEF, 2010). Dans de telles conditions, la maîtrise de la mobilisation en eau devient une préoccupation majeure. Le Sénégal dispose certes de fleuves de grande hydraulité (plus de 26 milliards de m³ par an), mais à ce jour, de vastes zones, jadis traversées par des cours d'eau sont devenues presque totalement dépourvues d'eau de surface par suite d'assèchement des rivières (DGPRE, 2015).

Face au caractère non pérenne des eaux de surface, le devenir des eaux souterraines, largement sollicitées, constitue une préoccupation majeure. Dans certaines régions du pays, les prélèvements excèdent les capacités de renouvellement des nappes (nappes des sables quaternaires du Cap Vert et des calcaires paléocènes de Sébikhotane). Ils ont accentué par ailleurs le phénomène d'intrusion saline notamment dans les vallées du Sine Saloum et au niveau des deltas de la Casamance et du fleuve Sénégal. Par ailleurs, la recharge des nappes est rendue d'autant plus difficile que l'urbanisation incontrôlée des grands centres urbains (tel que Dakar) a diminué les surfaces d'infiltration des eaux et de recharge des nappes. Le déficit de recharge des réservoirs souterrains à partir des apports pluviométriques est respectivement de 13 et 27% au cours des décennies 1970 et 1980 (Bamba et al., 1997).

Parmi les ressources en eau souterraine du Sénégal, figurent les nappes du Continental-Terminal et de l'Oligo-Miocène qui recouvrent une bonne partie du pays et connaissent un abaissement considérable de 20 à 25 m en 25 ans au horst de Ndiass. En 2015, on estimait à 207 le nombre de forages exploitant ces nappes dans les régions de Tambacounda et Kaffrine. Dans ces régions, la situation est particulièrement inquiétante. Des études menées sur la bordure méridionale du Ferlo, située entre ces deux régions y ont prédit un bilan hydrologique déficitaire global du fait que l'infiltration pendant la saison pluvieuse est reprise par évaporation pendant la saison sèche (BRGM, 1991).

Il résulte de tous les facteurs climatiques et anthropiques évoqués, une dégradation du système d'équilibre des nappes et de l'écosystème qui s'avère difficile à appréhender notamment pour

les régions de Tambacounda et Kaffrine.

Puisque la pérennisation de la ressource en eau passe par sa gestion adéquate, il est nécessaire de connaître le fonctionnement et les caractéristiques hydrodynamiques des aquifères afin de maîtriser leur évolution piézométrique suite à leur exploitation intense (Ndiaye et al., 2016) et à la baisse de la pluviométrie. Ce qui revient à faire une évaluation de l'état des réserves en eau (Faye, 2004) et une estimation de leur recharge. Pour ce faire, la Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau (DGPRE, 2015) a mis en place un programme de mesure et d'observation sur l'ensemble des aquifères du pays dans le but de contrôler l'évolution quantitative et qualitative de la ressource en eau de surface et souterraine (Gueye, 2018). Par conséquent, les missions sont effectuées avec une périodicité de deux mesures par an (en période d'étiage et en période de crue). Elles vont fournir des informations régulières sur les fluctuations des niveaux des nappes et leurs qualités chimiques afin de faciliter la gestion, la protection et l'exploitation, tout en assurant à la population une eau en quantité et en qualité. L'objectif général de cette étude est de contribuer à renforcer les connaissances du fonctionnement hydrogéologique dans la zone Tambacounda-Kaffrine pour une meilleure gestion quantitative des ressources en eau souterraine. De façon spécifique, il s'agira de :

- ✓ Faire une caractérisation hydrodynamique des aquifères du Complexe Terminal ;
- ✓ Faire une étude de l'évolution de la piézométrie des aquifères du continental terminal et de l'oligo-miocène ;
- ✓ Faire une estimation de la recharge ;
- ✓ Faire l'analyse de la qualité des eaux des aquifères du complexe terminal.

Cette étude comprend :

Un premier chapitre où sera présenté le cadre général de la zone d'étude. Il sera question d'y décrire son contexte géographique, le climat et facteur d'influence, son relief, l'hydrographie ainsi que les contextes hydrogéologique et géologique.

Le second chapitre entame l'étude expérimentale. Il présente l'ensemble des investigations menées pour caractériser les aquifères du complexe terminal ainsi que les méthodes d'interprétation employées. Il se poursuit par le troisième chapitre qui consistera en une restitution des résultats suivis d'une discussion.

II- PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

II. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

1. Contexte géographique

Notre zone d'étude concerne les régions administratives de Tambacounda et de Kaffrine qui ont une superficie cumulée de 53 887 km² soit 28% de la superficie du Sénégal et une population cumulée estimée à 1 248 302 habitants (d'après le recensement 2013). Elle est limitée par la région de Matam au Nord et Nord-Est ; les régions de Kaolack et Kolda à l'Ouest ; celles de Louga et Diourbel au Nord et par la région de Kédougou, au Sud. La zone d'étude est par ailleurs frontalière de la République du Mali à l'Est et de la République de Gambie, à l'Ouest et au Sud-Ouest.

La figure ci-dessous représente la carte de localisation de notre zone d'étude.

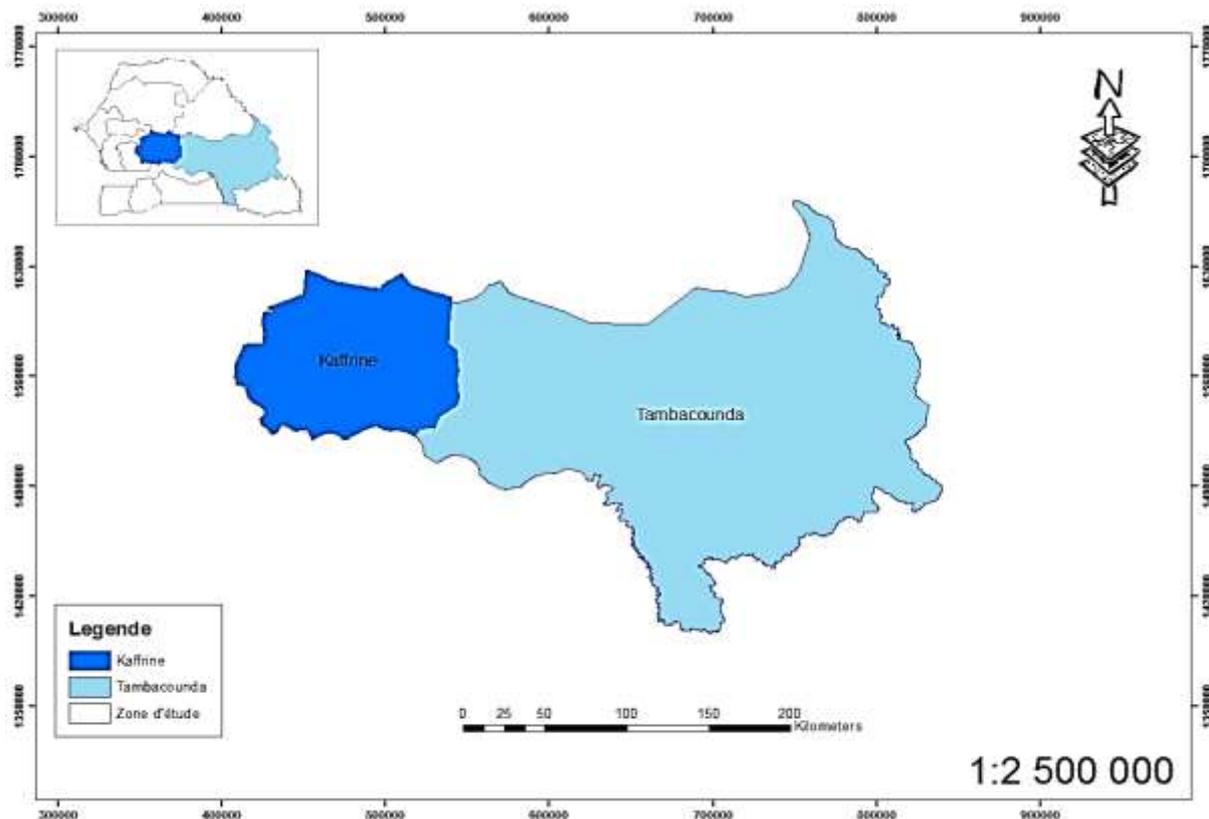


Figure 1: Localisation de la zone d'étude

2. Climat et facteurs d'influence

Le climat est de type soudano-sahélien avec une saison des pluies de courte durée, allant de juin-juillet à octobre et une longue saison sèche de 8 à 9 mois. Cette situation tient à la dynamique de la circulation atmosphérique générale qui prévaut en Afrique de l'Ouest.

Caractérisation hydrogéologique des aquifères du continental terminal et de l'oligo-miocène dans la zone
Tambacounda-Kaffrine (Sénégal)

Sous l'effet de l'anticyclone des Açores, la région est soumise aux types de vents que sont les alizés maritimes de secteur Nord, les alizés continentaux de direction Nord-Est, l'harmattan du secteur Est avec de l'air chaud et sec et la mousson avec de l'air chaud et humide dont l'arrivée annonce le début de la saison pluvieuse (mai - juin).

La pluviométrie connaît une variabilité interannuelle. La zone se situe entre les isohyètes 450 et 800 mm. Les températures sont généralement élevées, avec des variations importantes. Elles oscillent entre 26 et 39° C avec une moyenne mensuelle de 29° C et une durée d'ensoleillement moyenne journalière de onze (11) heures. Les plus basses températures sont enregistrées entre décembre et janvier et les plus élevées entre mars et mai.

La figure ci-dessous représente la carte de la translation des isohyètes pendant la sécheresse au Sénégal.

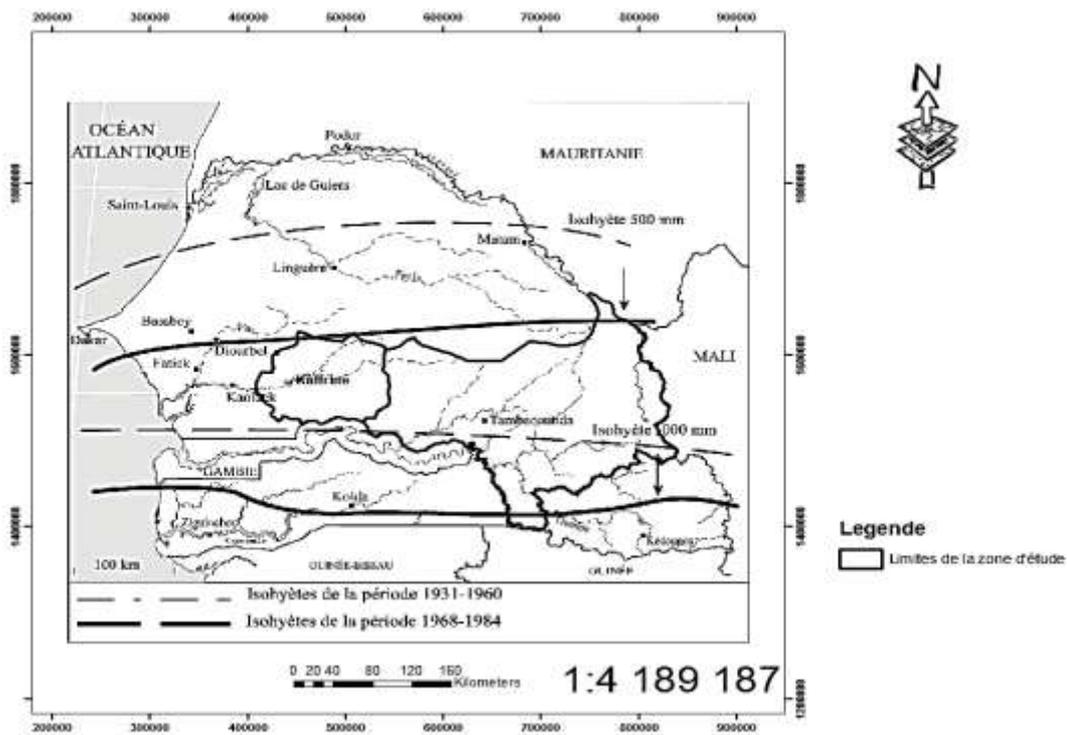


Figure 2: Carte de translation des isohyètes pendant la sécheresse au Sénégal
Source : J. Leborgne 1980

3. Reliefs et Sols

Le relief est plat dans son ensemble et présente une légère pente qui descend du nord au sud dans la région de Kaffrine et quelques collines dans le département de Bakel (Tambacounda). Ce relief est entrecoupé de légères dépressions constituées de vallées fossiles du Sandougou et du Mayeldiby. Ce terroir régional est également caractérisé par la présence de plusieurs mares dont quelques-unes seulement sont permanentes. Les sols rencontrés dans la zone sont de trois types :

- Les sols ferrugineux tropicaux (avec des variantes) exploités pour la culture de l'arachide et du mil. Ils sont sableux à sablo – argileux avec de bonnes aptitudes agricoles ;
- Les sols hydromorphes, qui caractérisent les bas-fonds et les cours d'eau, sont un peu dispersés dans la région avec un matériau généralement argileux. On les appelle aussi «deck» avec des variantes «dior» ;
- Les sols halomorphes, caractéristiques des milieux salés ou tannes, se rencontrent surtout dans le département de Birkelane (Tambacounda). Le matériau est souvent vaseux, si ce n'est du limon (ANSD, 2013).

4. Hydrographie

La région de Tambacounda est arrosée par un réseau hydrographique très important constitué par le fleuve Sénégal, la Falémé, le fleuve Gambie ainsi que plusieurs affluents et marigots qui drainent chaque année environ 30 milliards de m³ d'eau (ANSD, 2013).

Le régime hydrographique de la région de Kaffrine est constitué de deux cours d'eau principaux :

- le prolongement du Nord du fleuve Saloum, qui part de la région de Kaolack et couvre une partie du département de Birkelane ;
- la vallée du baobolong qui coule du sud-ouest de Nioro jusque vers l'Est de la région sur plusieurs kilomètres.

5. Contexte géologique

Le Sénégal est caractérisé par deux grands ensembles géologiques et structuraux :

- Le bassin sédimentaire côtier sénégal-mauritanien constitué de couches d'épaisseur variable de sables, argiles et calcaires qui s'étendent sur 1 400 km depuis la Mauritanie jusqu'en Guinée Bissau. La région de Kaffrine et une grande partie de la région de Tambacounda sont localisées dans cet ensemble ;
- Le socle ancien, représentant moins de 1/5 du territoire, est constitué de formations plutoniques et métamorphiques dans la partie orientale du Sénégal.

La carte géo-lithologique est représentée sur la figure ci-dessous :

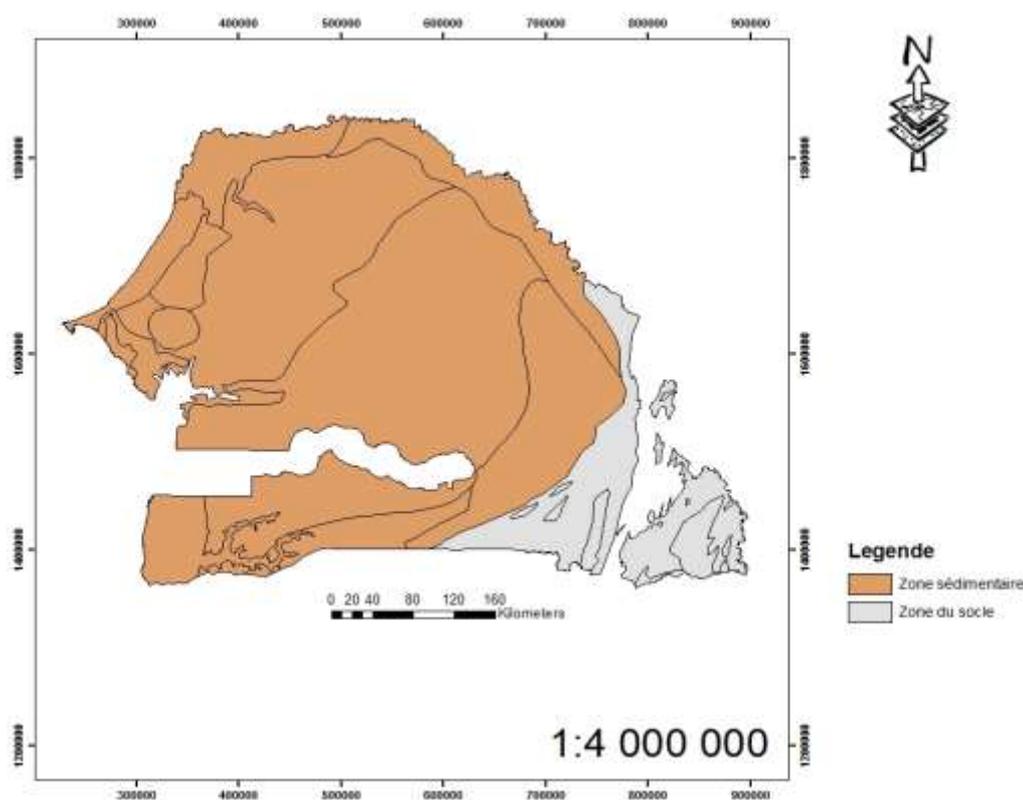


Figure 3: Carte Géo-lithologique du Sénégal

6. Contexte hydrogéologique

Des études hydrogéologiques, hydrodynamiques, géophysiques réalisées sur le bassin sédimentaire sénégalais ont permis d'identifier quatre (04) grands systèmes aquifères parmi lesquels le système aquifère superficiel qui est situé au-dessus des dépôts plus consolidés du système aquifère intermédiaire (Eocène et Paléocène) et du système aquifère profond (Maastrichtien). Son épaisseur varie entre 0 et 150 m et la profondeur de la nappe phréatique peut aller de quelques mètres à 72,5 m.

Les paramètres des aquifères du système superficiel sont généralement les suivants :

- Perméabilité : de 1×10^{-5} à $8,9 \times 10^{-4}$ m/s ;
- Transmissivité : de 8,64 à 1 728 m²/jour ;
- Coefficient de stockage : de 0,01 à 0,15 ;
- Rendement puits : de 50 à 183 m³/h (AIEA, 2017).

Ce système regroupe verticalement en partant du haut vers le bas les aquifères suivants :

L'aquifère du Continental Terminal : contient une nappe dans les formations sableuses et sablo-argileuses. C'est la nappe phréatique qui est surtout exploitée par les puits villageois et alimente la quasi-totalité de ces derniers dans la zone d'étude. Les argiles compactes parfois intercalées dans la série sont stériles et il peut s'avérer nécessaire pour les puits de les traverser avant de retrouver les nappes, maintenues en charge par ces argiles. Les variations de faciès du Continental Terminal expliquent les grandes différences de débits enregistrés d'un point d'eau à l'autre.

« Le puits de la Gouvernance » de Tambacounda foré en 1964 à la Bénétou, aurait fourni 20m³/h/m avec 5 ou 6 m de colonne d'eau. Par contre le forage du plateau, profond de 148 m n'a fourni que 5 m³/h dont une grande partie probablement en provenance de l'Eocène (Archambault, 1974).

Cette nappe du Continental Terminal, constitue une source d'eau de première importance compte tenu de son rôle initial de récepteur des eaux de pluie.

L'Oligo-Miocène : La structure de cet aquifère est complexe car souvent difficile à distinguer du Continental Terminal et se présente sous forme de plusieurs horizons sableux ou sablo-argileux superposés au nombre de deux ou trois. Les variations latérales, verticales de faciès sont fréquentes, l'aquifère se caractérisant par des passages rapides de sables grossiers à des sables moyens à fins, ou bien de sables fins à des sables argileux (Sène, 2012). La nappe de l'Oligo-miocène est localisée sur la bordure méridionale du Ferlo entre Kaffrine et Tambacounda et sur la partie sud du pays (Casamance) avec un potentiel estimé à 105 000m³/j (UNICEF, 2010).

Cette figure ci-dessous (*Figure 4*) représente la carte hydrogéologique de notre zone d'étude (Tambacounda-Kaffrine).

Caractérisation hydrogéologique des aquifères du continental terminal et de l'oligo-miocène dans la zone
Tambacounda-Kaffrine (Sénégal)

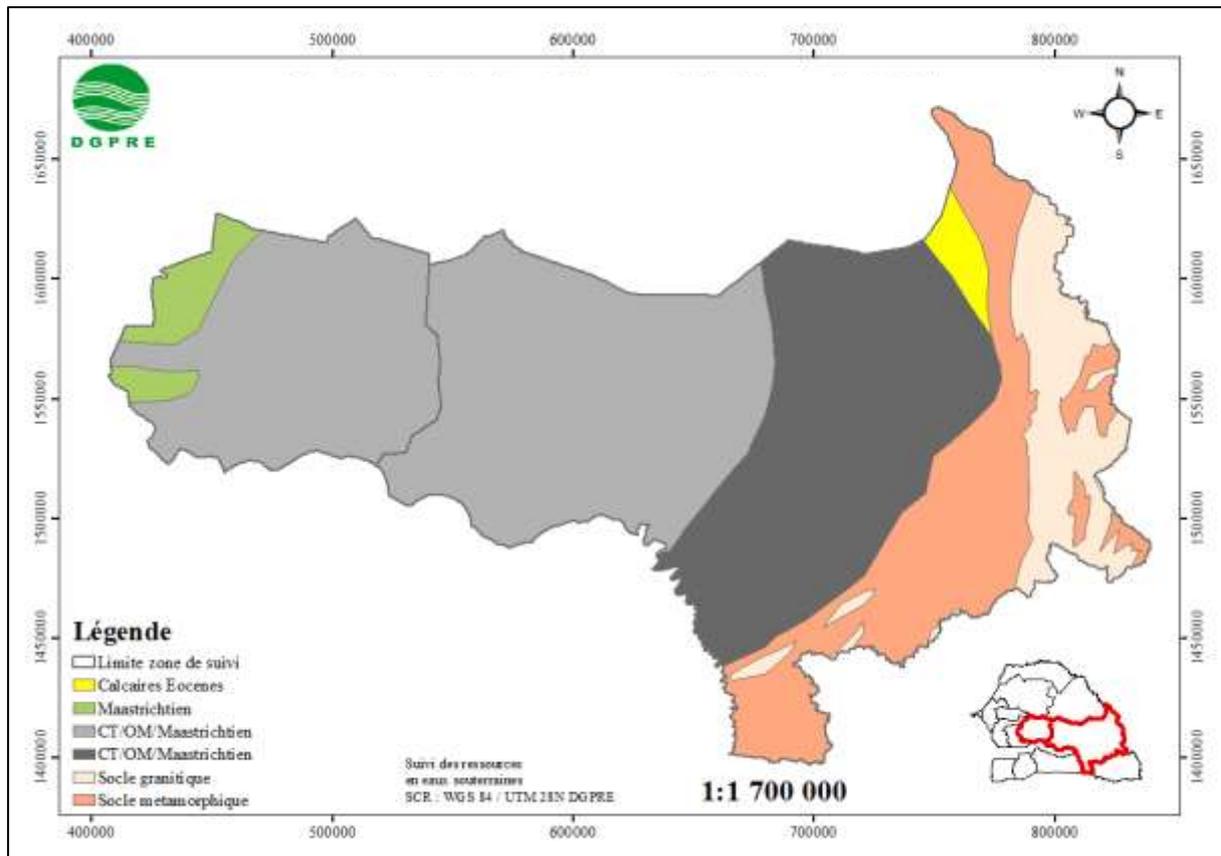


Figure 4: Carte hydrogéologique Tambacounda-Kaffrine
Source : DGP RE 2015

III- MATERIEL ET METHODES

III. MATERIEL ET METHODES

1. Données utilisées

Les paramètres des forages ont été recueillis à la Direction de la Gestion et de la Planification des ressources en Eau du Sénégal (DGPRES). Il s'agit de 162 forages dont les paramètres sont: la localité, la nature de l'ouvrage (forage ou puits), ses coordonnées géographiques (X, Y), l'altitude, la profondeur totale de l'ouvrage, la lithologie, les profondeurs du mur et du toit, le niveau piézométrique au repos, le débit d'exploitation, le rabattement et le débit spécifique.

Hors mis ces 162 forages, nous disposons de données relatives à 10 forages qui ont été utilisées pour l'étude de la piézométrie. En effet, ce sont ces forages qui sont destinés à assurer le suivi piézométrique de la zone d'étude.

Les données climatiques (2013-2018) ont été obtenues auprès de l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM).

2. Méthodes

2.1 Caractérisation hydrodynamique du complexe terminal

Les données mises à notre disposition seront utilisées pour faire une caractérisation hydrodynamique des aquifères du complexe terminal. Il sera question d'utiliser la statistique élémentaire en vue d'analyser les paramètres de forage et la productivité des aquifères.

2.1.1 Productivité du complexe terminal

Dans le but d'avoir une idée sur la productivité des aquifères du complexe terminal, nous avons mené une analyse des débits d'exploitation et des paramètres hydrodynamiques. Il s'agit de la transmissivité qui représente la capacité d'un aquifère à mobiliser l'eau qu'il contient et du débit spécifique que représente le rapport du débit d'exploitation au rabattement impliqué Assemian et al., (2014) ; Gnamba et al., (2014) ; Koudou et al., (2016); Mboudou, (2017) cité par Malunduma (2019).

Les tableaux suivants (*Tableau I, Tableau II et Tableau III*) représentent respectivement la classification des débits, transmissivités et débits spécifiques selon la classification du Comité Interafricains d'Etudes Hydrauliques (Yao et al., 2010; Mboudou, 2017) cité par Malunduma (2019)

Tableau I: Classification des débits selon CIEH

Intervalles	Classe
de 0 à 1 m ³ /h	Débits très faibles
de 1 à 2,5 m ³ /h	Débits faibles
de 2,5 à 5 m ³ /h	Débits moyens
de 5 à 10 m ³ /h	Débits forts
supérieur à 10 m ³ /h	Débits très forts

Tableau II: Classification des transmissivités selon CIEH

Intervalles	Classe
$T < 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$	Faible
$10^{-5} \text{ m}^2/\text{s} < T < 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$	Moyenne
$T > 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$	Forte

Tableau III: Classification des débits spécifiques selon CIEH

Intervalles	Classe
$Q_s < 0,1 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$	Domaine de l'hydraulique villageoise
$0,1 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m} < Q_s < 0,36 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$	Domaine de la petite hydraulique agricole
$0,36 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m} < Q_s < 1 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$	Domaine de l'hydraulique agricole
$Q_s > 1 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$	Domaine de l'hydraulique urbaine

3. Piézométrie

La piézométrie est représentée par la charge hydraulique définie par la formule suivante :

$$H = z + \frac{P}{\rho g} + \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

- H(m) : la charge hydraulique
- z : la cote du plan d'eau
- P : la pression
- ρ : la masse volumique de l'eau
- g : l'accélération de la pesanteur
- V : la vitesse du fluide

Or dans l'environnement souterrain, l'on se retrouve confronté à des vitesses d'écoulement très faibles. D'où, l'on néglige l'énergie cinétique représenté par le terme $V^2/2g$, nous obtenons donc :

$$H = z + P/\rho g \quad (2)$$

Cette charge se calcule par rapport à un repère qui est dans notre cas le niveau de la mer, ainsi la charge hydraulique se résume dans ce cas à la cote du plan d'eau dans l'ouvrage au niveau duquel la charge est déterminée (voir Figure 5 et Equation (5)).

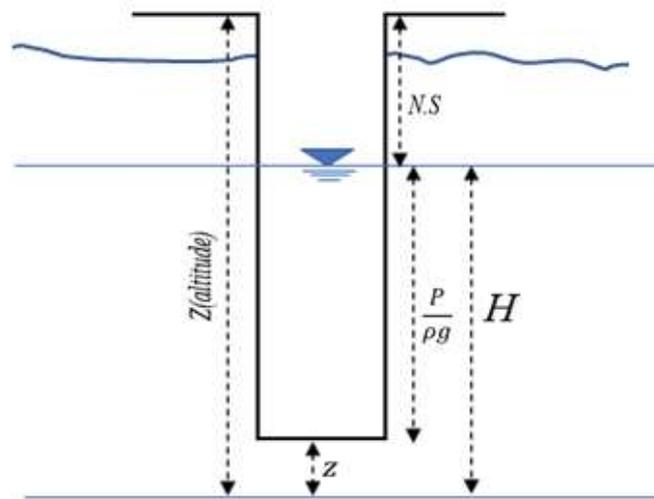


Figure 5: Détermination de la charge piézométrique.

$$H = Z - N.S \quad (3)$$

avec H, la hauteur piézométrique, Z, l'altitude du forage par rapport à la margelle de l'ouvrage

et N.S le niveau statique.

3.1 Traitement des données

Les données piézométriques qui ont été collectées grâce à la base de données de la DGPPE allaient de 1980 à 2018. Cependant, elles n'étaient pas toutes exploitables donc nous avons procédé à un traitement et un tri de ces dernières. Chaque point de mesure a été reporté sur la carte géologique de Tambacounda et Kaffrine pour savoir s'il se situait exactement sur un des aquifères étudiés. Ensuite nous avons vérifié si pour chaque année hydrologique des mesures ont été effectuées sur l'ensemble des piézomètres de la zone d'étude.

Ainsi, nous avons décompté 13 points de mesures qui captent la nappe de l'oligo-miocène. Après traitement 10 ont été retenus pour une période allant de 2013 à 2018 puisque c'est durant celle-ci que les relevés de niveau ont été réguliers. Les cartes piézométriques réalisées se basent alors sur ces 10 points de mesures durant cette période.

La figure ci-dessous (*Figure 6*) illustre la répartition du dispositif d'étude :

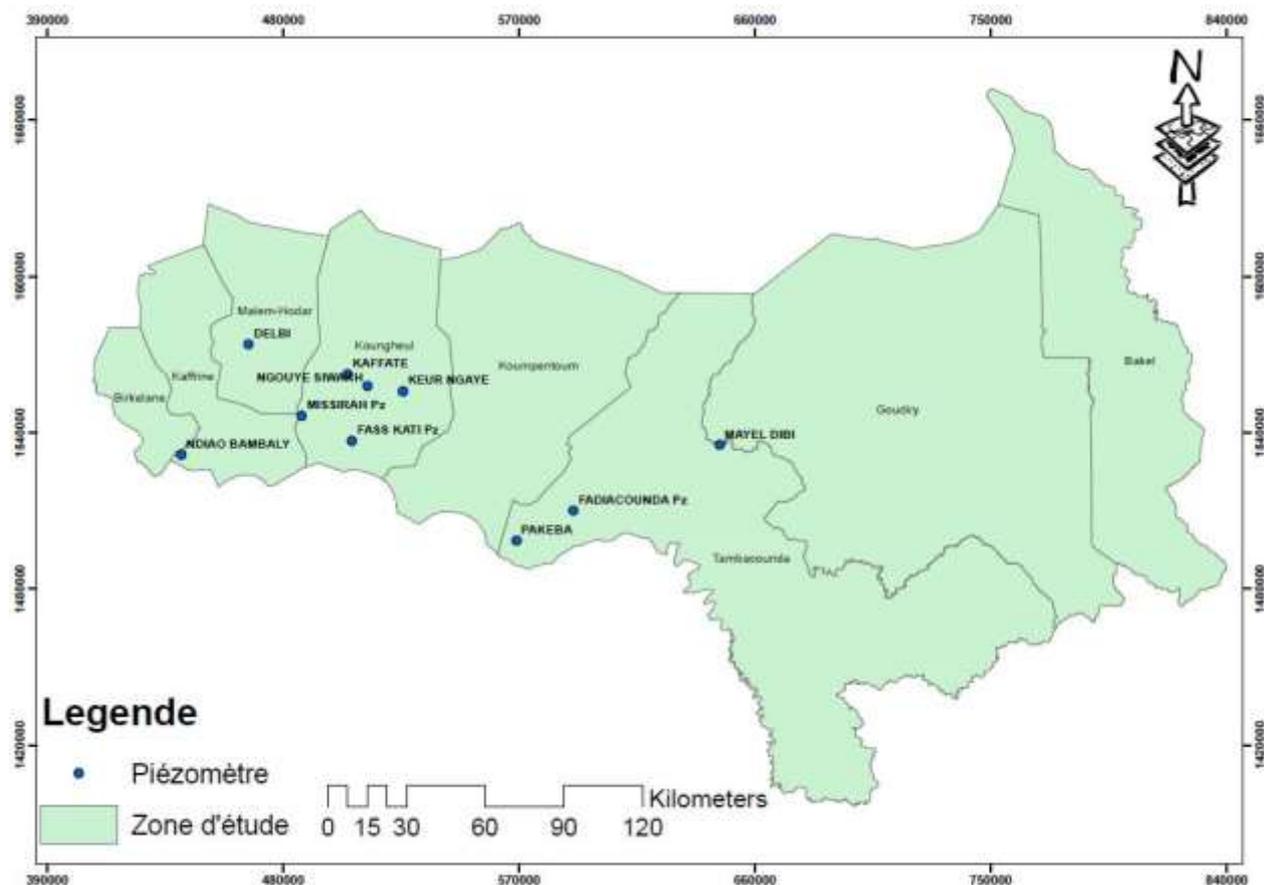


Figure 6: Localisation des ouvrages de suivi dans la zone d'étude Tambacounda-Kaffrine

3.2 Méthode de réalisation d'une carte piézométrique

Plusieurs essais de logiciels d'interpolation et de cartographie ont été testés pour réaliser les cartes piézométriques. Le logiciel ArcGIS version 10.3.1 a été retenu car l'interpolation s'est révélée être de meilleure qualité. Les cartes ont été réalisées sur ce dernier par la méthode de krigeage avec modèle de variogramme.

Un krigeage est une technique géostatistique de modélisation spatiale permettant à partir de points d'avoir une représentation de valeurs sur toute la surface de la zone étudiée (Gratton, 2002). Cela permet d'estimer l'altitude piézométrique en dehors des points de mesure. Cette technique a été choisie car elle tient compte de la distance entre les points de mesure (Matheron, 1969). Le krigeage se base sur l'hypothèse que deux données qui sont proches dans l'espace tendent à posséder des caractéristiques similaires. Il prend en compte la présence de dérives systématiques dues à des gradients hydrauliques, la carte qui en résulte respecte bien le comportement spatial de la piézométrie. Pour ces raisons, il est la méthode d'estimation linéaire

la plus précise (Gratton, 2002). Le logiciel ArcGIS construit la carte piézométrique par krigeage avec modèle de variogramme de façon autonome.

4. Estimation de la recharge

La gestion de l'eau souterraine dans une optique de développement durable nécessite la connaissance des taux de recharge puisque celle-ci constitue un élément clé du bilan hydrique qu'il faut connaître pour ne pas surexploiter la ressource (Gosselin, 2016). De plus, la recharge joue un rôle important dans le débit des cours d'eau, dans la vulnérabilité des aquifères, dans l'écologie des tourbières (milieux humides) et peut avoir un impact sur certains facteurs socio-économiques Alley & Leake (2004); Sophocleous & Devlin (2004); Devlin & Sophocleous (2005); Healy, (2010) cité par Gosselin (2016). La recharge est aussi un intrant important dans de nombreux simulateurs numériques qui sont de plus en plus utilisés pour la caractérisation des aquifères (Sanford, 2002). Ainsi, de nombreuses méthodes ont été développées pour estimer la recharge des aquifères.

Dans le cadre de cette étude et par rapport aux données mises à notre disposition, nous allons appliquer la méthode du bilan hydrologique pour estimer la recharge.

4.1 Analyse de la variabilité climatique

En vue d'apprécier la variabilité climatique dans notre zone d'étude, le test de Pettitt a été utilisé à cause de sa performance et sa robustesse (Nièl et al., 1998).

Le test de Pettitt est un test non paramétrique ne nécessitant aucune hypothèse quant à la distribution des données. Il est une adaptation du test de Mann-Whitney basé sur les rangs, permettant d'identifier le temps auquel se produit un changement (rupture).

Une rupture est définie comme un changement dans la loi de probabilité des variables aléatoires dont les réalisations successives définissent les séries chronologiques étudiées (Servat et al., 1998). Ce test a été utilisé dans plusieurs études de changements hydroclimatiques notamment en Afrique de l'Ouest Kouassi et al., (2012) cité par Kouamé et al., (2014). Il consiste à découper la série principale de N éléments en deux sous-séries à chaque instant t compris entre 1 et N-1. La série principale présente une rupture à l'instant t si les deux sous-séries ont des distributions différentes.

$$U_{t,N} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^N D_{ij} \quad (4)$$

$$D_{ij} = \text{sgn}(X_i - X_j) \quad (5)$$

- $\text{sgn}(X) = 1$ si $X > 0$
- $\text{sgn}(X) = 0$ si $X = 0$
- $\text{sgn}(X) = -1$ si $X < 0$

La probabilité de dépassement approximative d'une valeur k est définie et permet d'apprécier l'importance de la rupture :

$$\text{Prob}(K_N > k) \approx 2 \exp\left(-\frac{6k^2}{N^3 + N^2}\right) \quad (6)$$

L'absence de rupture dans la série de taille N constitue l'hypothèse nulle. Si l'hypothèse nulle est rejetée, une estimation de la date de rupture est donnée par l'instant t définissant le maximum en valeur absolue de la variable $U_{t,N}$. Le test de Pettitt a été appliqué à partir du programme XLSTAT 2019.

4.2 Bilan hydrologique

Pour la détermination quantitative de la recharge des nappes, plusieurs méthodes ont été proposées et testées. Des approches hydrodynamiques, hydrologiques et des modèles mathématiques ont été adoptés. La méthode du bilan hydrologique est l'une des plus utilisées pour la détermination de la lame d'eau infiltrée (Lallahem, 2002) ; (Kouassi et al., 2007). Le schéma conceptuel du bilan hydrologique suppose que la zone non saturée est divisée en deux parties :

- une zone d'échange (sol-plante-atmosphère), d'épaisseur relativement faible (généralement moins d'un mètre) et d'humidité très variable.
- une zone de transfert d'humidité peu variable et au moins égale à celle correspondant à la capacité au champ. Dans le fonctionnement de ce système, la pluie P satisfait préférentiellement aux besoins suivants : l'ETR et la reconstitution de la zone d'échange jusqu'à la capacité au champ. Le volume correspondant appelé réserve facilement utilisable du sol (RFU) doit satisfaire l'évaporation en période de non apport.

L'excédent éventuel d'apport constitue le ruissellement et l'infiltration traversant la zone de transfert pour atteindre la nappe.

Ainsi, l'infiltration ou la recharge des aquifères est évaluée à partir de l'équation 6 :

$I = P - (ETR + Ru) \pm \Delta S$	(7)
-----------------------------------	-----

Avec I la lame d'eau infiltrée (mm) ; P la pluviométrie (mm) ; ETR l'évapotranspiration réelle (mm) et Ru la lame d'eau ruisselée (mm) ; ΔS la variation de stock . La pluie étant connue, il faut estimer l'ETR et le ruissellement, afin d'en déduire l'infiltration.

➤ **Estimation de l'évapotranspiration potentielle ETP et de l'évapotranspiration réelle ETR**

Le phénomène d'évapotranspiration correspond à la partie des eaux météoriques qui s'évapore soit directement sous l'effet des variations de température et de l'ensoleillement, soit indirectement sous l'action des plantes (transpiration propre et spécifique à la photosynthèse).

On distingue :

- l'évapotranspiration potentielle (ETP) qui serait la quantité d'eau évaporée si la quantité d'eau précipitée disponible pour l'évapotranspiration en surface était toujours supérieure à la quantité évaporée ;
- et l'évapotranspiration réelle (ETR) qui désigne la quantité réellement évaporée (tenant compte des déficits ponctuels du sol en eau).

Ces deux facteurs dépendent de très nombreux paramètres (précipitations, température, insolation, vent, végétation, nature du sol, réserve utile du sol...). Ils sont exprimés en hauteur d'eau précipitée (mm). ETP et ETR sont des facteurs qui n'ont pas la même variabilité inter-annuelle que la pluviométrie.

A partir des données météorologiques, plusieurs formules ont été utilisées au Sénégal pour calculer l'évapotranspiration potentielle et réelle. Il s'agit des formules empiriques de Penman (1948) ; de Thornthwaite (1954) et de Turc (1961).

Dans le cadre de cette étude, l'ETP et l'ETR seront calculées par la formule de Thornthwaite qui dans notre cas est la plus adéquate par rapport aux données mises à notre disposition.

La formule de l'ETP d'après Thornthwaite est la suivante :

$ETP = 16 \times \left(10 \times \frac{t}{I}\right)^a \times F(\lambda)$	(8)
--	-----

Avec :

t : température moyenne mensuelle en °C ; a : fonction complexe de I ; I : Indice thermique annuelle (qui est la somme des indices thermiques mensuels $i=(t/5)^{1,514}$; F (λ) : coefficient de correction en fonction de la latitude λ du lieu considéré.

La méthodologie de calcul de l'ETR selon Thornthwaite peut être décrite ci-dessous.

On admet que le sol est capable de stocker une certaine quantité d'eau (Reserve Facilement Utilisable=RFU) et cette eau peut être reprise pour l'évapotranspiration par l'intermédiaire des plantes. La quantité d'eau stockée dans la réserve est comprise entre 0 (la réserve est vide) et 200 mm (la réserve est pleine) avec une moyenne de 100 mm. Cette quantité varie suivant les sols et sous-sols considérées. Dans notre cas, nous considérons que la RFU est égal à 100 mm.

On admet que la satisfaction de l'ETP a priorité sur l'écoulement. Par ailleurs, la complétion de la réserve facilement utilisable (RFU) est également prioritaire sur l'écoulement. On établit ainsi un bilan à l'échelle mensuelle à partir de la pluie (P) du mois, de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et de la réserve facilement utilisable (RFU) selon les règles suivantes :

- si $P \geq ETP$ alors :

$ETR = ETP$	(9)
-------------	-----

- si $P < ETP$ alors :

$ETR = P + R_{i-1}$	(10)
---------------------	------

L'évapotranspiration va se réaliser non seulement sur la totalité des pluies mais encore sur les réserves du sol : $ETR = P + R_i$. Mais une fois les réserves (RFU) épuisées, l'évapotranspiration ne pourra se réaliser que sur les pluies effectivement tombées (d'où $ETR=P$). Il en résultera un déficit du bilan ($Da = ETP - ETR$) qui représente le déficit agricole, c'est-à-dire sensiblement la quantité d'eau qu'il faudrait apporter aux plantes pour qu'elles ne souffrent pas d'un stress hydrique.

Pour la période 2013-2017, nous avons choisi le mois de septembre comme point de départ de l'année hydrologique pour la simple raison que le mois d'août étant le plus pluvieux les réserves sont à saturation et donc connue et égale à 100 mm qui représente la RFU.

- L'estimation du ruissellement (Ru) est réalisée à partir de la formule de Tixeront :

$Ru = P^3 / 3ETP^2$	(11)
---------------------	------

Avec Ru, la lame ruisselée moyenne annuelle (mm) ; P, la lame précipitée moyenne annuelle (mm) ; ETP, l'évapotranspiration potentielle moyenne (mm).

- **Limites de la méthode du bilan de Thornthwaite**

La méthode du bilan de Thornthwaite demande beaucoup de prudence dans la manipulation des résultats car son application demande une longue période d'observation. De plus, le choix de la hauteur d'eau maximale qui s'ajoute parfois à l'humidité du sol étant assez arbitraire celle-ci peut être source d'erreurs sur les excédents et les déficits (Remenieras, 1972) cité par Zade, (2011). En effet, l'étude du régime hydrique sur des sols faite par Charreau (1961) et basée sur des mesures de profils d'humidité dans le temps, a montré que les valeurs usuellement attribuées à la réserve facilement utilisable, celles généralement fixées aux environs de 100 mm, dépasseraient 350 mm, voire 580 mm dans certains sols, elles seraient même beaucoup plus importantes pour les sables et grès argileux du continental terminal. La répartition de l'excédent d'eau entre l'écoulement superficiel et la percolation profonde, reste très arbitraire.

Malgré cela, il convient de ne pas en sous-estimer sa portée. La méthode de Thornthwaite reste une méthode efficace puisqu'elle permet de donner un intervalle de grandeurs des différents paramètres intervenant dans l'estimation des réserves du sol, et avec peu de moyens.

4.3 Etude de la variation des saisons climatiques

L'étude de la variation des saisons des pluies est basée sur une analyse comparative des valeurs d'évapotranspiration potentielle (ETP) et réelle (ETR) au pas de temps mensuel. Les valeurs d'ETP et ETR ont été calculées par la méthode de Thornthwaite. La méthode de calcul de l'ETP selon Thornthwaite a été présentée précédemment.

Un graphe établi sur une période interannuelle (2013-2017) a mis dans un même référentiel la courbe traduisant l'évolution des ETP mensuelles et celle des ETR mensuelles. Les comportements des deux courbes permettent de définir les différentes périodes pluvieuses ou

sèches. La période pluvieuse se définit par une superposition des courbes d'ETP et d'ETR. La période sèche se définit par la position de la courbe des ETP au-dessus de la courbe des ETR. L'opération vise à cerner les différentes périodes de l'année hydrologique. Cette étude dans le temps a permis de souligner l'impact de la variabilité climatique sur les régimes saisonniers.

5. Etude de la qualité des ressources en eau souterraine

Pour cette partie, nous avons utilisé les résultats des études de la DGPRE réalisées en 2018 visant à caractériser l'hydrochimie des nappes Oligo-Miocène et Continental Terminal dans la zone d'étude.

La campagne s'est déroulée du 5 au 15 Juin 2018 et a porté sur :

- Des mesures de paramètres physico-chimiques in situ (conductivité, pH et température). Ces paramètres doivent être mesurés nécessairement sur le terrain pour obtenir des résultats fiables compte tenu de leur variation possible au cours du transport des échantillons ou durant leur conservation.
- Des prélèvements de vingt (20) échantillons qui ont été analysés au laboratoire. Les résultats devront nous renseigner sur la qualité chimique des eaux des différentes nappes suivies.

IV- RESULTATS ET DISCUSSION

IV. RESULTATS ET DISCUSSION

1. Caractérisation hydrodynamique

1.1 Analyse des paramètres de forage et des paramètres hydrodynamiques

Sur la base des données de 162 forages nous avons effectué une étude statistique pour l'analyse des paramètres des forages (profondeur totale forage, épaisseur d'altération) et des paramètres hydrodynamiques (transmissivité, débit spécifique). Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau suivant :

Tableau IV: Statistique élémentaire des paramètres de forage.

Statistique	Pt (m)	EpA (m)	Ns (m)	Q (m ³ /h)	Qs (m ³ /h/m)	T (m ² /min)
Nb. d'observations	162	34	161	160	134	23
Minimum	41,300	2,000	5,550	0,900	0,030	0,010
Maximum	240,000	91,000	72,350	90,000	88,830	0,090
Moyenne	120,769	40,271	41,155	42,293	5,964	0,024
Ecart-type (n)	36,320	23,696	16,339	20,375	8,930	0,025
CV	3,325	1,699	2,519	2,076	0,668	0,964

Avec :

Pt : Profondeur totale des forages

EpA : Epaisseur d'altération

Ns : Niveau statique des forages

Q : Débit d'exploitation des forages

Qs : Débit spécifique

T : Transmissivité

CV : Coefficient de variation.

La profondeur totale des forages varie entre 41,30 et 240 m avec une moyenne de 120,77 m. Le forage d'une profondeur de 240 m est localisé dans la région de Tambacounda. Il capte l'horizon sableux de l'oligo-miocène. Quant aux niveaux statiques, ils oscillent entre 5,55 et 72,35 m avec une moyenne de 41,16 m.

En ce qui concerne les valeurs de transmissivité, elles varient entre 0,01 et 0,09 m²/min soit sur la classe des transmissivités fortes selon la classification CIEH avec une moyenne de 0,024 m²/min. Les fortes valeurs de transmissivités pourraient s'expliquer par la nature géologique de l'aquifère capté. En effet, le complexe terminal est composé de sables et d'argile sableuse en proportion variable ; 90% des forages dont nous disposons des données de transmissivité captent la partie sableuse des aquifères du complexe terminal qui sur le plan hydrogéologique possèdent de bonnes propriétés hydrauliques. Les travaux effectués par Kouassi et al. (2014), dans le même contexte sur le continental terminal à Abidjan ont montré des résultats similaires avec des valeurs de transmissivité qui oscillent entre 0,028 m²/s et 0,34 m²/s. Des études faites sur les aquifères superficiels notamment le continental terminal et l'oligo-miocène au large du bassin Sénégal-Mauritanien ont montré que les valeurs de transmissivité dans ces aquifères varient entre 10⁻⁴ et 2.10⁻² m²/s.

Les valeurs des débits spécifiques oscillent entre 0,03 et 88,83 m³/h/m. Les débits d'exploitation varient entre 0,9 et 90 m³/h avec une moyenne de 42,29 m³/h. Les valeurs des coefficients de variation CV des transmissivités et des débits spécifiques calculées varient entre 60 et 100 %. Elles mettent en évidence la forte dispersion de ces paramètres.

La figure ci-dessous (*Figure 7*) représente la fréquence des débits par classe de débit. Elle fait apparaître que sur l'ensemble des observations, les débits très faibles (0 à 1 m³/h) et faibles (1 à 2,5 m³/h) représente pour chacun 0,62% de l'effectif total des débits d'exploitation, les débits forts (5 à 10 m³/h) représentent 3,13% et ceux très forts (Q>10 m³/h) représentent 95,66% des observations. En ce qui concerne les débits spécifiques, on constate que le domaine de l'hydraulique villageoise et de la petite hydraulique représentent pour chacun 0,75% des observations, le domaine de l'hydraulique agricole représente 7,46%, le domaine de l'hydraulique urbaine occupe 91,04% des effectifs. Par rapport à ces observations, les aquifères du complexe terminal présentent une productivité relativement forte pour toutes les lithologies présentes dans la zone d'étude. Cependant, on constate que la majorité des débits très forts sont fournis par les forages qui captent l'horizon sableux. Les fortes valeurs des débits sont en adéquation avec les valeurs des transmissivités. Ce qui confirme la forte productivité des aquifères du complexe terminal.

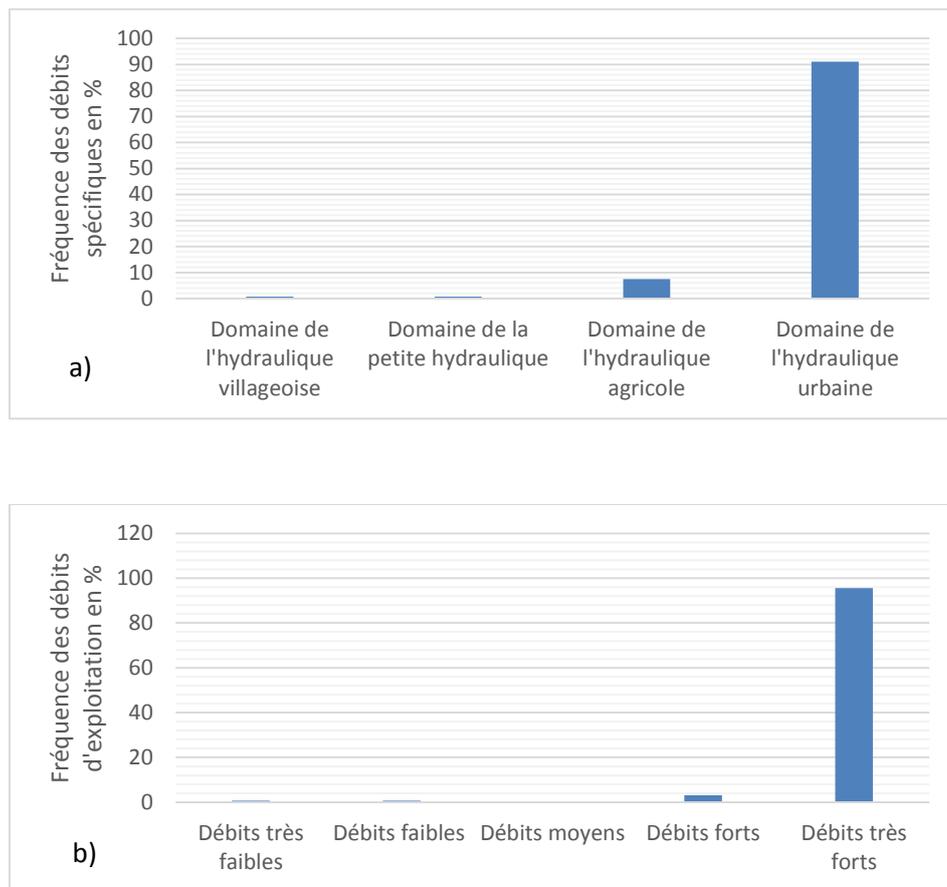


Figure 7: a) Fréquence des débits spécifiques par classe ; b) Fréquence des débits d'exploitation par classe.

2. Evolution de la piézométrie

2.1 Evolution de la piézométrie pour la période 2013-2018

Nous avons établi les courbes d'évolution temporelle de la piézométrie de nos ouvrages de suivi de 2013 à 2018 (*Figure 8*). Les amplitudes de fluctuation piézométrique varient entre -25,11 et 2,43 m. A l'exception des piézomètres Fadiacounda et Ndiao Bambaly, l'allure des courbes permet de distinguer le même comportement des piézomètres durant la période d'étude. Pour cette raison, nous avons décidé de ne présenter que les cartes piézométriques (crue et étiage) pour l'année 2017.

Les cartes piézométriques des autres années sont placées en annexe (annexe 2).

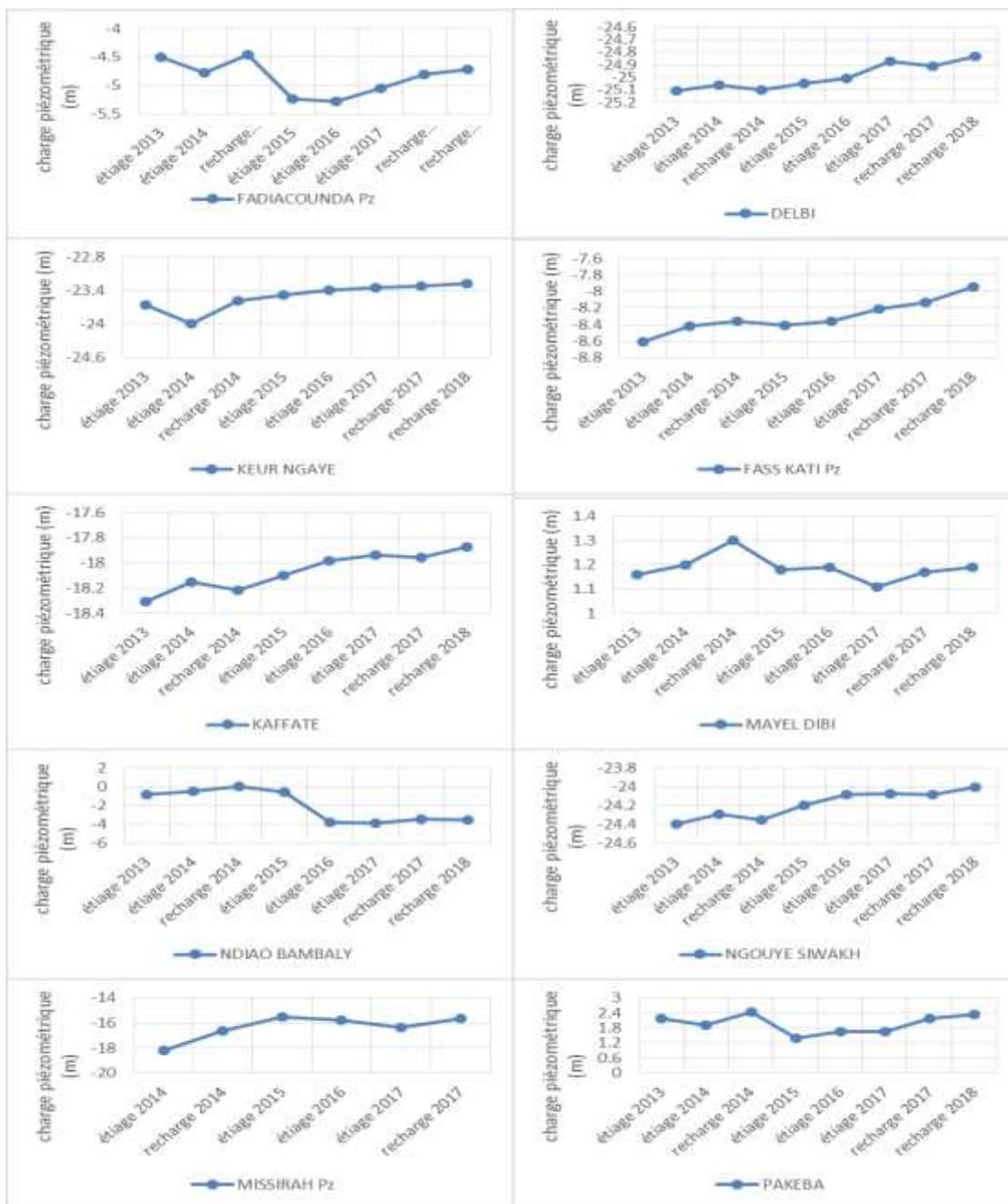
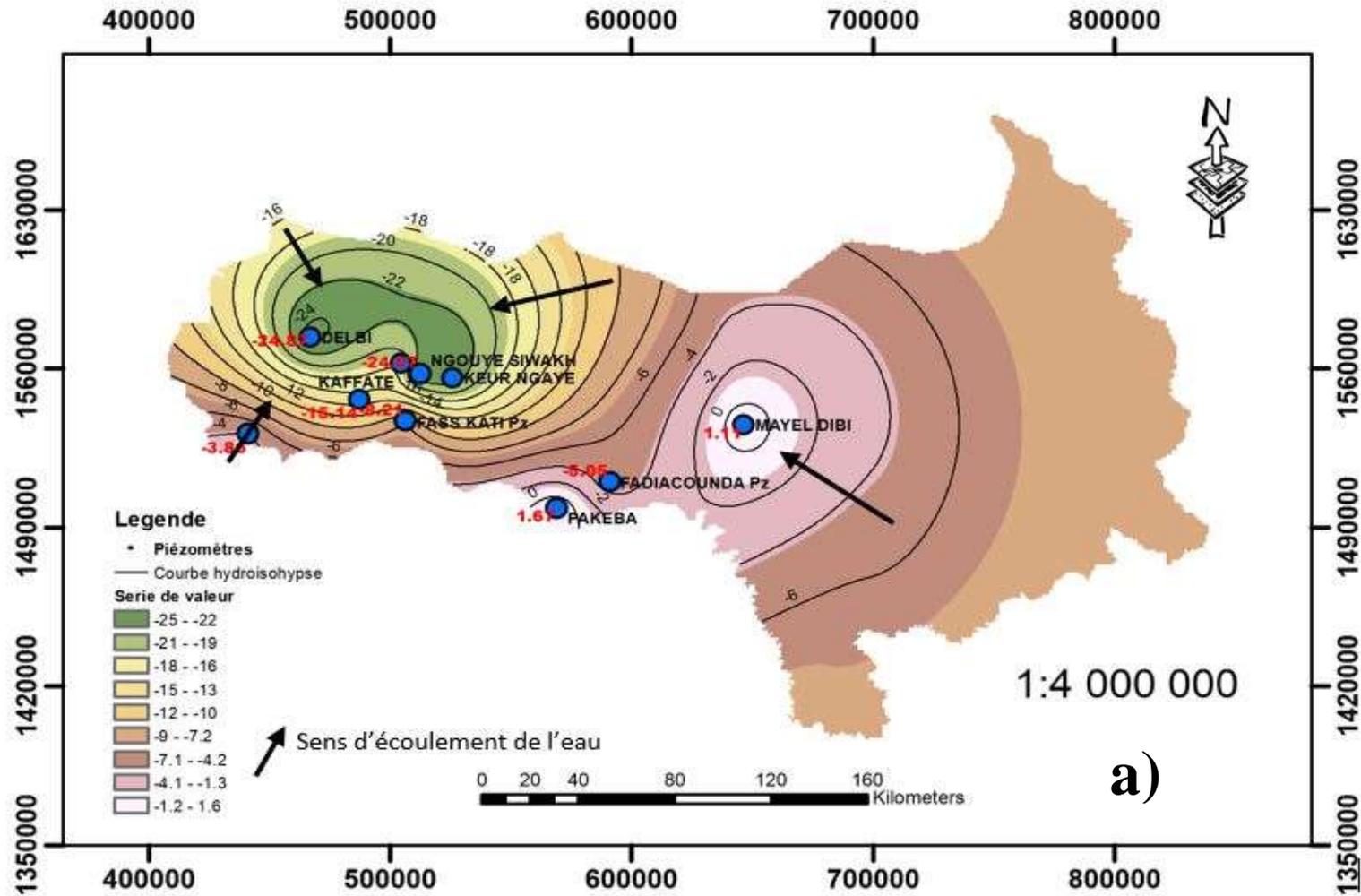


Figure 8: Courbes d'évolution temporelle de la piézométrie de la nappe oligo-miocène entre 2013 et 2018.

2.2 Description des cartes piézométriques

La carte piézométrique, établie pour la période de basses eaux, présente la même morphologie piézométrique que celle de la période de hautes eaux (Figure 9). Ces cartes ne font pas

apparaître une hausse importante de la piézométrie à l'exception des piézomètres sur Pakéba et sur Fadiacounda où la surface piézométrique fluctue respectivement de 51 cm et 24 cm, ce qui restent faibles en valeur absolue. Ces zones forment des dômes localisés probablement dans des zones de recharge et contrôlent l'écoulement de ce système vers la dépression. Les gradients hydrauliques négatifs sur la quasi-totalité de la zone d'étude pourraient indiquer des zones de plus faible perméabilité; vu la faible densité des points de mesure et l'influence de la topographie, il convient néanmoins de rester prudent sur cette interprétation.



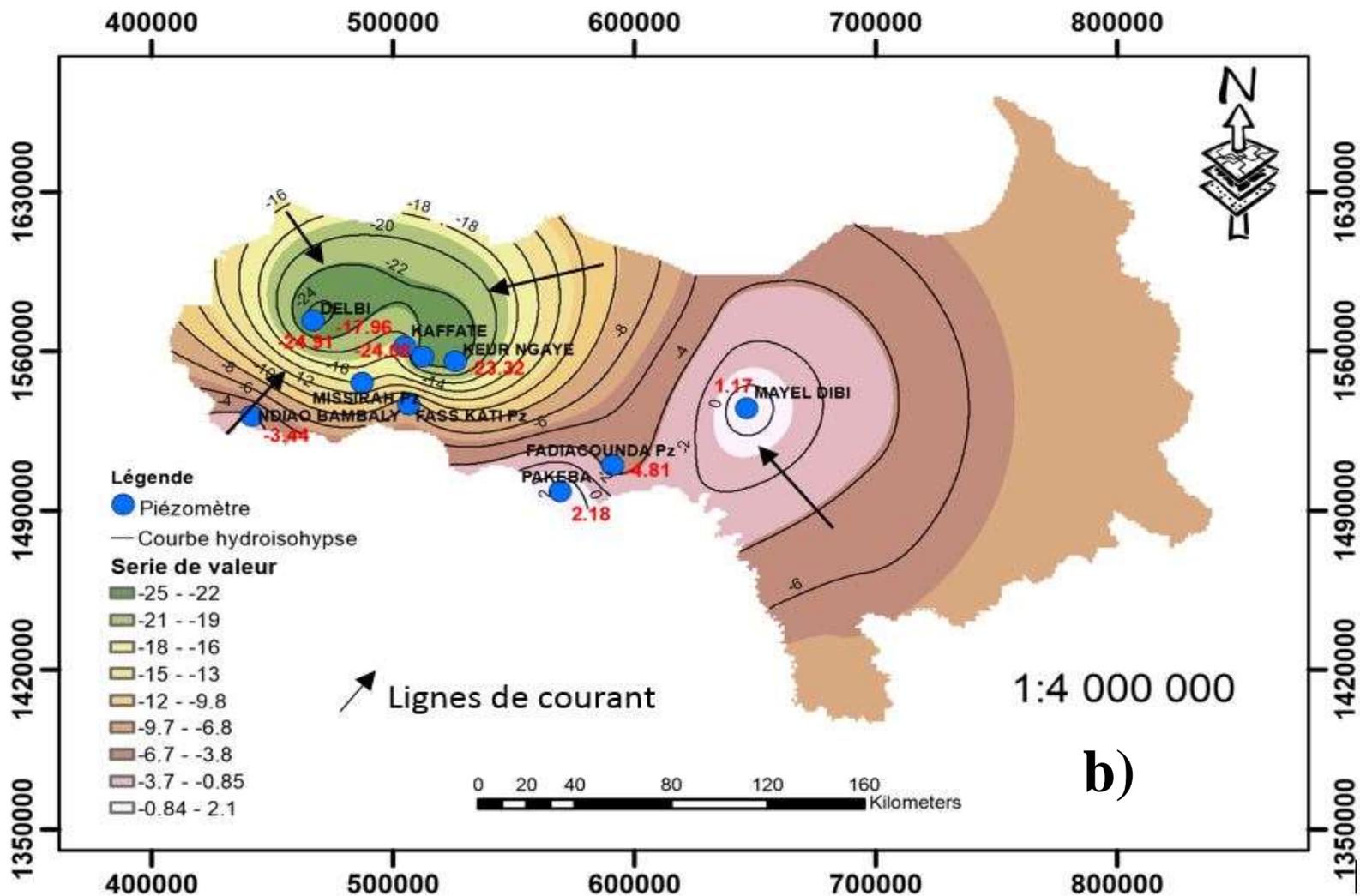


Figure 9: Cartes piézométriques a) période étiage 2017; b) période recharge 2017

2.3 Evolution de la piézométrie en fonction du temps

Entre les périodes d'été 2014-2015 et 2016-2017 pour les piézomètres Mayel et Délbi situés respectivement dans le dôme et dans la dépression, on constate une légère évolution des niveaux piézométriques (*Figure 10*). Cependant, on constate que le piézomètre situé dans la dépression accuse une hausse supérieure à celui dans le dôme. On remarque sur ce piézomètre que les piques de niveau piézométrique sont obtenus en période de basses eaux et qu'au niveau du dôme c'est le contraire qui s'y passe ; en période de hautes eaux le niveau piézométrique est à son maximum et en période de basses eaux on assiste à une baisse.

La hausse générale de la piézométrie observée peut être liée à l'évolution de la pluviométrie qui de 2013 à 2018 a connu une hausse dans la zone d'étude. Bien que ne disposant pas de données sur la lithologie au droit du piézomètre situé au niveau du dôme, les logs de forage d'ouvrages voisins (dans un rayon de 500 m) semblent indiquer la prédominance d'un état de surface à tendance sableuse. Cet état de surface perméable ferait de cette zone, un endroit de recharge préférentielle.

En ce qui concerne la zone de dépression, la faible valeur de la charge piézométrique en période de hautes eaux, est liée à un état de surface argileux comme en témoignent la lithologie d'ouvrages voisins. L'évolution positive du niveau piézométrique dans la dépression en période de basses eaux (absence de pluie) semble être liée à l'existence des cours d'eau dans cette zone qui en période de basses eaux alimentent la nappe et ainsi favorisent le relèvement du niveau piézométrique. Ce qui suppose l'existence d'une source de recharge des nappes outre que les eaux pluviales.

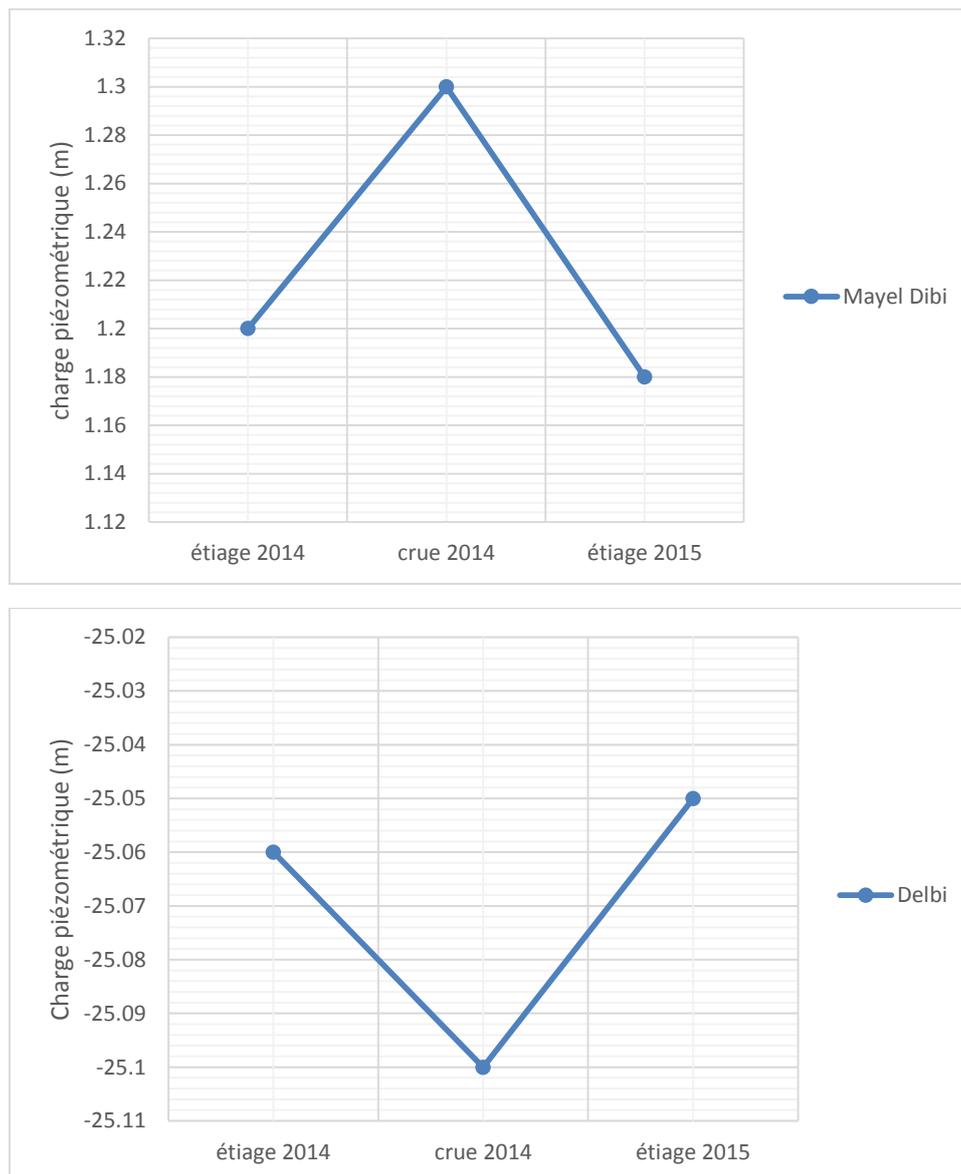


Figure 10: a) Evolution temporelle du niveau piézométrique dans le dôme,
b) Evolution temporelle du niveau piézométrique dans la dépression.

3. Estimation de la recharge

3.1 Analyse de la variabilité climatique

L'application du test de Pettitt sur la base des données fournies par l'ANACIM et provenant de la station Kaffrine montre que l'hypothèse nulle, absence de rupture a été rejetée étant donné que la p-value calculée est inférieure au niveau de signification alpha (*Tableau V*). Ainsi, il existe une rupture de la série pluviométrique que le test de Pettitt place en 1998 (*Figure 11*). Cette rupture détectée correspond à une baisse significative de la pluviométrie entre 1981 et

1998. Ces résultats révèlent l'hétérogénéité des précipitations. Ils permettent ainsi de confirmer la baisse globale des précipitations constatée autour des années 1980 et mettent en évidence la variabilité climatique qu'a connue cette zone.

Les résultats obtenus sur la base des données de la station Tambacounda (annexe 4) montre que dans ce secteur, de 1981 à 2017, il n'y a pas eu de rupture de la série pluviométrique.

Tableau V Paramètres du test de Pettitt.:

t	1998
p-value	0,010
alpha	0,05

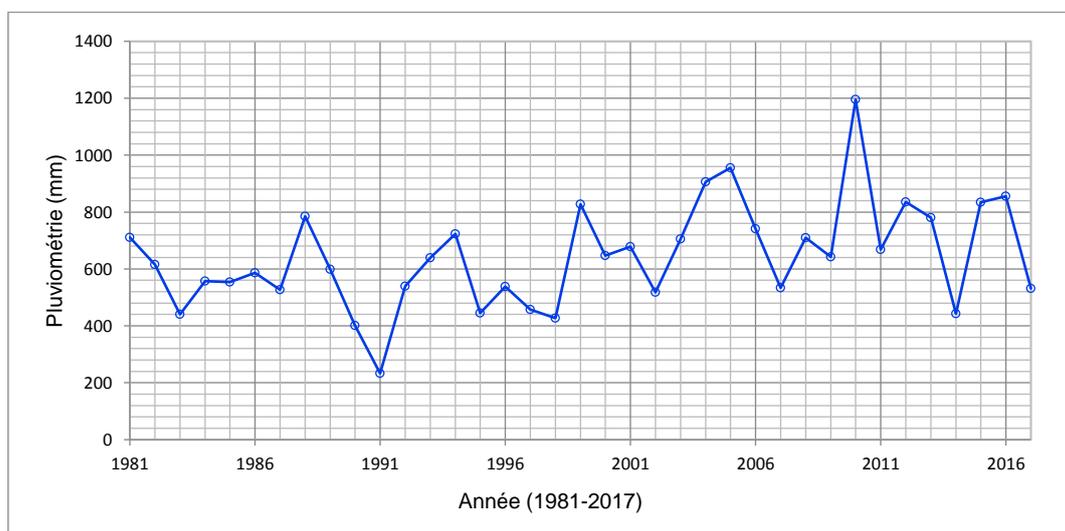


Figure 11: Courbe de la série pluviométrique (Kaffrine), (1981-2017).

3.2 Bilan hydrologique

Le bilan hydrologique est établi aux stations de Tambacounda, Kounghel et Kaolack par la méthode de Thornthwaite à partir des moyennes mensuelles des précipitations et des températures pour la chronique 2013-2017.

3.3 Etude de la variation des saisons climatiques

L'analyse de l'évolution simultanée de l'évapotranspiration potentielle (ETP) et de l'évapotranspiration réelle (ETR) montre deux phases (Figure 12):

- d'Octobre à Juillet : l'ETP est au-dessus de l'ETR ;
- de Juillet à Octobre : l'ETP est confondue à l'ETR.

Les périodes au cours desquelles, l'ETP est au-dessus de l'ETR, correspondent à des périodes sèches et les périodes au cours desquelles, l'ETP est confondue à l'ETR, correspondent à des périodes humides. On dénombre respectivement huit mois pour le premier cas (périodes sèches) et quatre mois pour le deuxième cas (périodes humides).

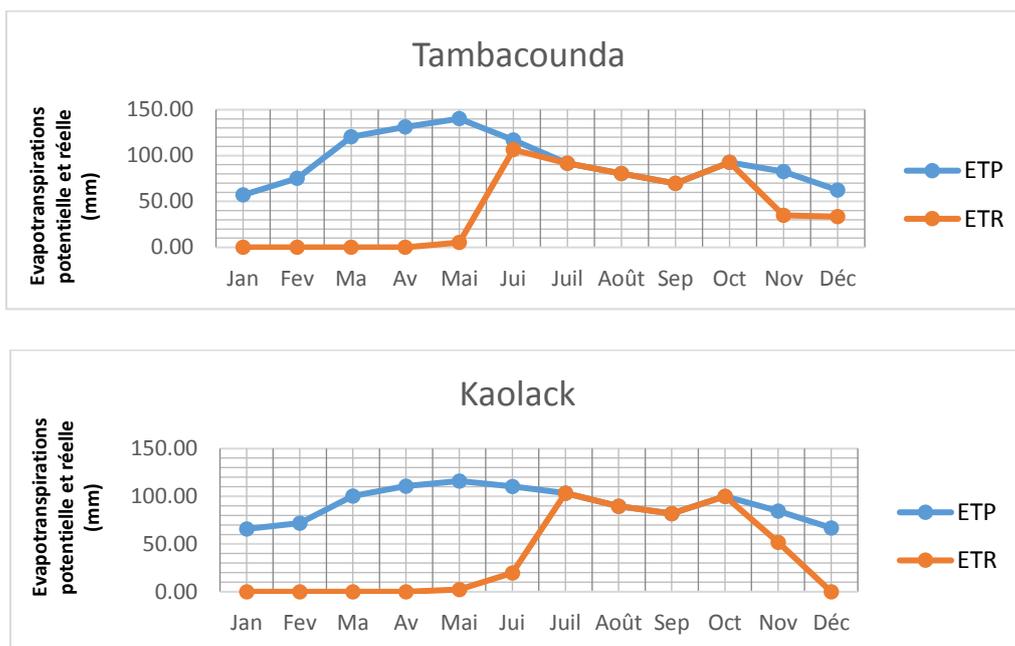


Figure 12: Evolution de l'ETP et de l'ETR dans les régions de Tambacounda et Kaolack (2013-2017).

3.4 Analyse du bilan hydrologique

Pour établir le bilan hydrologique de 2013 à 2017, nous avons considéré trois stations météorologiques.

Les résultats obtenus sont représentés dans les tableaux suivants :

Tableau VI: Bilan hydrologique de la station de Tambacounda (2013-2017).

Mois	P (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	RFU (mm)
Janvier	0	57,06	0	0,00
Février	0	75,19	0	0,00
Mars	0	120,30	0	0,00
Avril	0	131,16	0	0,00
Mai	5,14	140,16	5,14	0,00
Juin	106,34	116,90	106,34	0,00
Juillet	97,88	91,45	91,45	6,43

**Caractérisation hydrogéologique des aquifères du continental terminal et de l'oligo-miocène dans la zone
Tambacounda-Kaffrine (Sénégal)**

Mois	P (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	RFU (mm)
Août	272,90	Mois 80,30	80,30	100,00
Septembre	218,64	69,57	69,57	100,00
Octobre	26,10	92,72	92,72	33,38
Novembre	0	82,38	33,38	0,00
Décembre	0	62,21	0,00	0,00

Tableau VII: Bilan hydrologique de la station de Kounghel (2013-2017).

Mois	P (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	RFU (mm)
Janvier	0	57,99	0	0,00
Février	0	70,85	0	0,00
Mars	0	107,72	0	0,00
Avril	0	127,42	0	0,00
Mai	0,00	141,68	0,00	0,00
Juin	39,86	129,63	39,86	0,00
Juillet	150,76	97,70	97,70	53,06
Août	238,14	79,61	79,61	100,00
Septembre	166,26	80,05	80,05	100,00
Octobre	36,34	92,91	92,91	43,43
Novembre	0	81,69	43,43	0,00
Décembre	0	58,02	0,00	0,00

Tableau VIII: Bilan hydrologique de la station de Kaolack (2013-2017).

Mois	P (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	RFU (mm)
Janvier	0	65,79	0	0,00
Février	0	72,01	0	0,00
Mars	0	100,46	0	0,00
Avril	0	110,72	0	0,00
Mai	2,30	116,01	2,30	0,00
Juin	19,56	110,43	19,56	0,00
Juillet	163,26	103,27	103,27	59,99
Août	182,30	89,56	89,56	100,00
Septembre	203,80	81,83	81,83	100,00
Octobre	51,60	99,98	99,98	51,62
Novembre	0,06	84,56	51,68	0,00
Décembre	0	67,04	0,00	0,00

Tableau IX: Résumé des bilans hydrologiques dans les stations de Tambacounda, Kounghel et Kaolack (2013-2017).

Station Tambacounda							
P (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	Surplus (mm)	RFU (mm)	delta RFU (mm)	Déficit bilan ETP-ETR (mm/an)	Excédent bilan P-ETR (mm/an)
727,00	1119,40	478,90	248,10	239,81	0,00	640,50	248,10

Station Kounghel							
P (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	Surplus (mm)	RFU (mm)	delta RFU (mm)	Déficit bilan ETP-ETR (mm/an)	Excédent bilan P-ETR (mm/an)
631,36	1125,26	433,57	197,79	296,48	0,00	691,69	197,79

Station Kaolack							
P (mm)	ETP (mm)	ETR (mm)	Surplus (mm)	RFU (mm)	delta RFU (mm)	Déficit bilan ETP-ETR (mm)	Excédent bilan P-ETR (mm)
622,88	1101,65	448,18	174,70	311,62	0,00	653,47	174,70

L'analyse de ce tableau montre que les précipitations reçues en moyenne à Tambacounda, Kounghel et Kaolack sont respectivement 727 mm, 631 mm et 623 mm et que l'ETP est de 1102 mm à Kaolack, 1125 mm à Kounghel et 1119 mm à Tambacounda. Les quantités d'eau évaporées sont de 433,57 mm à Tambacounda soit 59,64% des précipitations, 433,57 mm à Kounghel soit 68,67% des précipitations et 448,18 mm à Kaolack soit 71,95% des précipitations. On observe un déficit du bilan (ETP-ETR) qui est respectivement de 640,50 mm, 691,69 mm et 653,47 mm à Tambacounda, Kounghel et Kaolack. L'excédent d'eau se répartissant entre le ruissellement et l'infiltration est de 248,10 mm à Tambacounda soit 34,13% des précipitations, 197,99 mm à Kounghel soit 31,33% des précipitations et 174,70 mm à Kaolack soit 28,05% des précipitations.

➤ **Calcul de l'infiltration (la recharge) à partir du bilan hydrologique**

Les résultats obtenus après détermination de la recharge sont consignés dans le tableau suivant :

Tableau X: Résultats de calcul de la recharge.

	Peff. (mm)	Ru (mm)	I = R (mm)
Tambacounda	248,10	102,21	145,88
Kounguel	197,79	66,25	131,54
Kaolack	174,70	66,37	108,32

Avec :

Peff. : Pluie efficace ;

Ru : Ruissellement calculé par la formule de Tixeront-Berkaloff,

I ou R : la recharge.

➤ **Discussion**

Ces résultats montrent que l'essentiel des eaux précipitées retourne à l'atmosphère sous forme d'évapotranspiration (71% des précipitations à Tambacounda, 72% à Kaolack et 69% à Kounguel). L'estimation de la recharge à partir du bilan hydrologique donne une valeur de 145,88 mm à Tambacounda soit 20% des précipitations, 131,54 mm à Kounguel soit 21% des précipitations et 108,32 mm à Kaolack soit 17% des précipitations. Nous retiendrons que la recharge des nappes se fait pendant la saison des pluies et particulièrement en août et septembre.

Des études similaires ont été réalisées dans la région de Tambacounda par l'approche du bilan hydrologique selon Thornthwaite par (Zade, 2011). Les résultats de ces travaux ont donné pour l'ETR une moyenne de 508 mm soit 74% des précipitations et un taux de recharge de 94 mm soit 13,60% des précipitations ce qui va dans le même sens que les résultats de nos travaux.

Ainsi, les résultats du bilan hydrologique montrent que la détermination de l'ETR par la méthode de Thornthwaite, l'évaluation du ruissellement par la méthode de Tixeront-Berkaloff a été une approche efficace.

Les résultats de l'analyse de la variabilité climatique montrent que dans la région de Tambacounda la période de 1981 à 2017 est caractérisée par une pluviométrie globalement humide avec une moyenne de 719,88 mm. Dans la région de Kaffrine, on constate une

pluviométrie faible de 1981 à 1998. Cependant, la période après 1998 est caractérisée par une certaine reprise pluviométrique. La moyenne des précipitations entre 1981 et 1998 est de 575,20 mm alors que dans la période 1999 à 2017 la moyenne est égale à 778,21 mm. Ces résultats vont dans le même sens que ceux d'un certain nombre de travaux (Ali et al., 2008 ; Ali et Lebel, 2009 ; Ouoba, 2013 et Bodian, 2014) qui suggèrent que la période 1970-1998 correspond à la grande sécheresse et que la période 1999-2013 enregistre un retour à des conditions plus humides.

4. Etude de la qualité des ressources en eau

4.1 Le potentiel hydrogène

Pour la nappe Oligo-Miocène, on enregistre sur douze (12) ouvrages suivi en 2017 des valeurs de pH qui varient entre 7,8 et 10,5. Tous les ouvrages ont un pH basique ce qui traduit l'alcalinité des eaux de la nappe Oligo-Miocène. Cependant la majorité des ouvrages respectent la norme de l'OMS comprise entre (6,5 et 9,2) à l'exception des piézomètres localisés à Fass Kati, Keur Ngaye, Mayel Dibi, Maka Koulibanta, Fadiacounda et Pakéba qui ont un pH situé au-dessus de la recommandation OMS.

Pour la nappe du Continental Terminal, les valeurs de pH varient entre 7,9 et 10,3. Ils restent basiques sur l'ensemble des ouvrages, ce qui fait que les eaux sont alcalines. Les pH respectent la norme OMS sauf au niveau des ouvrages situés à Bohe Baledji, Bani Israel, Bantanani et Méréto Dialoube.

4.2 La température

Les valeurs de températures mesurées dans la nappe Oligo-Miocène varient entre 31,3 et 33°C avec une moyenne de 32°C. Ceci reflète le caractère semi profond de l'aquifère (DGPRES, 2015). Au niveau du Continental Terminal, les valeurs de température varient entre 30,2 et 41,1 °C avec une moyenne de 34°C.

4.3 La conductivité électrique

Les valeurs de conductivité mesurées dans la nappe Oligo-Miocène varient entre 43,3 et 1058 µS/cm. Dans la nappe du Continental Terminal, la conductivité est moins importante et varie entre 27,3 et 597 µS/cm. Les valeurs mesurées dépassent rarement les 500 µS/cm dans les deux nappes sauf à l'Ouest de la région de Kaffrine, à Ngodiba où les eaux de l'Oligo-miocène sont probablement touchées par le biseau salé du Saloum (annexe 3). Cependant la répartition

spatiale des valeurs mesurées montre que la minéralisation des eaux est pratiquement très faible dans la région de Tambacounda sur les deux nappes. Ce qui montre que les eaux dans cette zone sont de bonne qualité du point de vue salinité.

Tableau XI: Résultats de l'analyse statistique des paramètres physico-chimique de la nappe de l'oligo-miocène.

	CE ($\mu\text{s/cm}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	pH
Norme	2000		6,5 – 9,2
Concentration maximale	1058	33	10,5
Concentration minimale	43,3	31,3	7,8
Moyenne	345	32	9
Ecart type	207	0,4	0,8

Tableau XII: Résultats de l'analyse statistique des paramètres physico-chimiques de la nappe du continental-terminal.

	CE ($\mu\text{s/cm}$)	T ($^{\circ}\text{C}$)	pH
Norme	2000		6,5 – 9,2
Concentration maximale	597	41,1	10,33
Concentration minimale	27,3	30,2	7,9
Moyenne	167	34	9
Ecart type	154,5	2,5	0,7

4.4 Distribution des éléments chimiques

Pour la nappe de l'Oligo-Miocène, six (06) échantillons ont été prélevés. Les résultats des analyses chimiques (tableau XIII) montrent que l'ensemble des échantillons ont des concentrations en éléments majeurs (Ca^{2+} ; Mg^{2+} ; Na^{+} ; K^{+} ; NO_3^{-} ; HCO_3^{-} et SO_4^{2-}) très faibles situées en dessous des normes maximales admises par l'OMS, sauf pour les chlorures qui sont très présents à Ngodiba, ce qui met en évidence la contamination des eaux par le biseau salé du fleuve Saloum. On remarque aussi que les teneurs en fer sont très élevées à Fass Katy (4,98 mg/l).

Tableau XIII: Résultat de l'analyse statistique des paramètres chimiques de l'oligo-miocène.

	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	Ca	Mg	Na	K	Fe	F	PO ₄
Norme (mg/l)		200	400	50	200	50	200	12	0,2	1,5	
Concentration maximale (mg/l)	305	314,5	3,14	34,87	128,7	19,85	56,2	4,93	4,98	0,3	0,11
Concentration minimale (mg/l)	15,25	4,17	0,06	0,61	6,93	2,18	2,31	0,56	0,12	0	0,07
Ecart type	102,18	85,21	0,80	9,36	38,94	6,91	18,27	0,97	1,28	0,04	0,01

Pour la nappe du Continental Terminal, les résultats (*Tableau XIV*) montrent des concentrations en éléments majeurs qui respectent les normes OMS. Cependant, les teneurs en nitrate restent toujours élevées au niveau du forage de Ndiao Bambaly dans la région de Kaffrine. Elles atteignent 53,09 mg/l et dépassent ainsi les normes OMS. L'origine de ces nitrates serait certainement due à l'agriculture. On note aussi une concentration en fer qui atteint plus de 0,2 mg/L correspondant à la norme OMS dans certains forages.

La présence du fer dans le complexe terminal peut provenir de la dissolution des roches et du lessivage des sols (il y a décomposition d'éléments organiques provenant de la végétation) ou liée à l'activité humaine (les déversements d'effluents industriels ou urbains, la corrosion des conduites d'amenée d'eau, l'utilisation de certains procédés dans le traitement même de l'eau).

Tableau XIV: Résultats de l'analyse statistique des paramètres chimiques du continental-terminal.

	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	Ca	Mg	Na	K	Fe	F	PO ₄
Norme (mg/l)		200	400	50	200	50	200	12	0,2	1,5	
Concentration maximale (mg/l)	305	38,24	47,81	53,09	32,29	7,94	72,81	6,43	0,56	0,22	0,1
Concentration minimale (mg/l)	12,2	3,56	0,03	0,55	3,28	0,69	0,92	0,29	0,03	0	0,06
Ecart type	79,30	10,48	12,97	14,47	10,39	2,96	19,13	1,59	0,16	0,06	0,01

L'analyse des résultats montre qu'on a au niveau du continental terminal des eaux de bonne qualité avec des valeurs de conductivités électriques qui ne dépassent pas les 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et des concentrations en éléments chimiques respectant pour la plupart les normes OMS. De même dans la nappe de l'oligo-miocène la qualité est assez bonne avec des conductivités qui ne dépassent pas les 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ à l'exception du piézomètre de Ngodiba situé dans la zone de contamination des eaux du Saloum.

4.5 Les faciès chimiques des eaux

La représentation des résultats des analyses chimiques sur un diagramme de piper (*Figure 13*) permet d'identifier les différentes familles hydrochimiques.

Pour les eaux de la nappe Oligo-Miocène, le faciès bicarbonaté est dominant sur l'ensemble des échantillons. Ainsi on a :

- ✚ Le faciès bicarbonaté calcique et magnésien ($\text{Ca}/\text{Mg}-\text{HCO}_3^-$) à Délbi.
- ✚ Le faciès bicarbonaté calcique ($\text{Ca}-\text{HCO}_3^-$) au niveau du forage de Ndiobène, à Fadiacounda et à Fass Kati.
- ✚ Le faciès bicarbonatés sodiques et potassiques ($\text{Na}/\text{K}-\text{HCO}_3^-$) à Mayel Dibi.
- ✚ Le faciès chloruré calcique à Ngodibi.

Pour les eaux du Continental Terminal, trois familles hydrochimiques ont été identifiés.

- ✚ Le faciès bicarbonaté calcique ($\text{Ca}-\text{HCO}_3^-$) au puits de Bantanani et au niveau des forages de Missira et Bani Israel ;
- ✚ Le faciès chloruré calcique ($\text{Ca}-\text{Cl}^-$) au forage de Ndiao Bambaly ;
- ✚ Le faciès bicarbonatés sodiques et potassiques ($\text{Na}/\text{K}-\text{HCO}_3^-$) au forage de Méréto

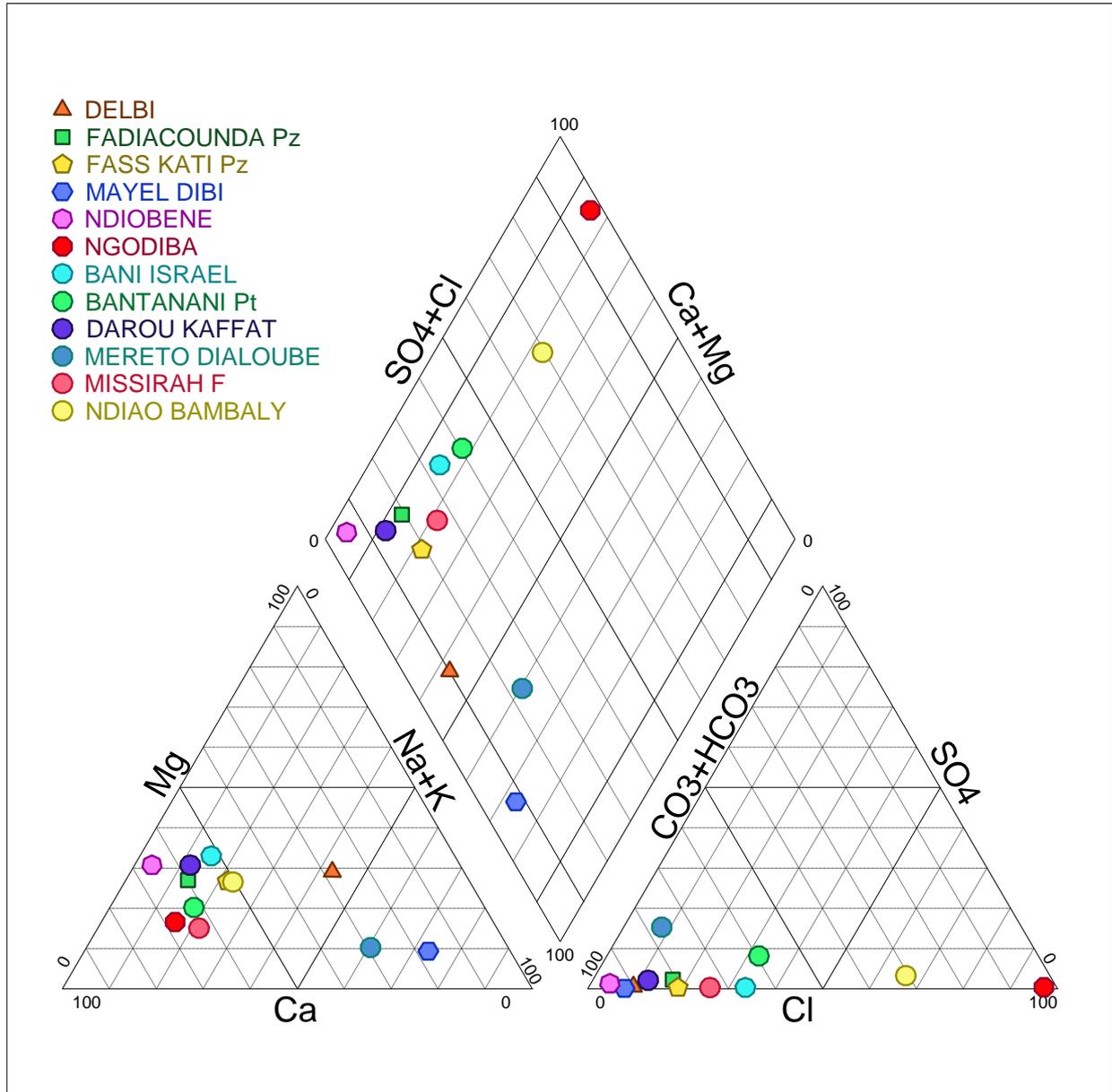


Figure 13:représentation des faciès hydrochimiques des eaux des nappes oligo-miocène et continental terminal dans les régions de Tambacounda Kaffrine (crue, 2017)

V. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ce travail a porté sur la caractérisation hydrogéologique des aquifères du continental terminal et de l'oligo-miocène (système du complexe terminal). Il avait pour objectifs de faire une caractérisation hydrodynamique, d'étudier l'évolution de la piézométrie et estimer la recharge des aquifères du complexe terminal.

Il ressort de cette étude que les aquifères sont très productifs. En effet, les valeurs de transmissivité varient entre 0,01 et 0,02 m²/min et celles du débit d'exploitation entre 0,9 et 90 m³/h. L'analyse statistique faite sur les paramètres de forages tels que l'épaisseur d'altération, la profondeur des forages par rapport aux débits d'exploitation montre en premier lieu que la productivité des forages n'est pas liée uniquement à l'épaisseur d'altération mais aussi à la nature de celle-ci. Par contre, on constate que plus la profondeur des forages qui captent les sables est grande plus la productivité est importante. Cette conclusion n'est pas valable dans les sables argileux où la productivité semble plutôt être liée à la nature des sables argileux.

L'étude de la piézométrie a montré un relèvement de la surface piézométrique entre 2013 et 2018. La carte piézométrique établie fait ressortir que les écoulements se font du centre vers le Nord-Ouest de Tambacounda où est localisée la plus grande dépression et pourrait même être l'exutoire du système. L'évolution temporelle du niveau piézométrique des ouvrages situés dans le dôme et dans la dépression est différente. Au niveau du dôme, on constate un relèvement du niveau piézométrique pendant la saison des hautes eaux. Ce qui s'explique par le fait que la période des hautes eaux correspond à la saison des pluies donc il y a une recharge des nappes qui s'effectue par infiltration puis percolation. Au niveau de la dépression la recharge en période d'étiage est certainement due à une alimentation de la nappe par les cours d'eau.

Sur le plan hydrochimique, la qualité des eaux est bonne avec des conductivités qui ne dépassent pas 600 µs/cm à l'exception du piézomètre sur Ngodiba situé dans la zone de contamination des eaux du Saloum. Les résultats montrent que les concentrations des éléments chimiques respectent les normes fixées par l'OMS.

L'estimation de la recharge par la méthode du bilan donne une valeur moyenne de 128,58 mm soit 19,47 % des précipitations dans la zone d'étude ce qui va dans le même sens que les conclusions faites par des études antérieures dans le même contexte.

Comme perspectives, nous tenons d'abord à rappeler qu'il n'y avait pas de données suffisantes et fiables pour faire une estimation de la transmissivité et de l'emmagasinement. Par conséquent, nous avons travaillé avec les paramètres de la base de données DGPRES, dans laquelle il n'y avait pas de données sur les coefficients d'emmagasinement.

A cela, s'ajoute le fait que l'étude de la piézométrie porte uniquement sur l'oligo-miocène car jusque-là il n'y a pas assez de piézomètres qui captent le continental terminal pour permettre son suivi dans le temps.

Ces limites offrent de nouvelles perspectives pour l'amélioration des connaissances sur les aquifères du complexe terminal (continental terminal et oligo-miocène).

VI. BIBLIOGRAPHIE

- Aurélié Lamé. (2014). Modélisation hydrogéologique des aquifères de Paris et impacts des aménagements du sous-sol sur les écoulements souterrains (Thèse de doctorat). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris, France.
- AIEA. (2017). Gestion intégrée et durable des systèmes aquifères et des bassins partagés de la région du Sahel (Rapport du projet régional de coopération technique N° RAF/7/011). Vienne (Autriche).
- ANSD. (2013). Situation économique et Sociale Régionale au Sénégal : Service Régionale de la Statistique et de la Démographie à Tambacounda.
- ARDOIN-BARDIN S. (2004). Variabilité hydroclimatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne (Thèse de doctorat). Université Montpellier II, France.
- Assemian, E. A., Kouamé, F. K., Saley, M. B., Affian, K., Youan Ta, M., Jourda, J. R. & Biemi, J. (2014). Étude de la productivité d'un aquifère de socle et approche statistique pour la détermination des tranches de profondeurs potentiellement productives : cas de la région de Bongouanou, est de la Côte d'Ivoire. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 27 (1), 81–97. <https://doi.org/10.7202/1021984ar>.
- Bon, A. F., Ndam Ngoupayou, J. R., Ewodo Mboudou, G. & Ekodeck, G. E. (2016). Caractérisation hydrogéologique des aquifères de socle altéré et fissuré du bassin versant de l'Olézoa à Yaoundé, Cameroun. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 29 (2), 149–166. <https://doi.org/10.7202/1036545ar>.
- Bricquet, J., F. Bamba, Mahé, G, M. Tourè and J. Olivry (1997). Variabilité des ressources en eau de l'Afrique Atlantique. *PHI* 6: 83-95.
- BRGM. (1991). Etude hydrogéologique de la bordure méridionale du Ferlo entre Kaffrine et Tambacounda.
- DIAGANA A. (1994). Etude Hydrogéologique dans la vallée du fleuve Sénégal entre Bakel et Podor : Relation eaux de surface/eaux souterraines (Thèse de doctorat). Université

Cheikh Anta DIOP, Dakar, Sénégal.

DGPRES. (2015). Note sur les ressources en eau du Sénégal :Zone potentielle pour le transfert d'eau.

Eric Lalot. (2014). Analyse des signaux piézométriques et modélisation pour l'évaluation quantitative et la caractérisation des échanges hydrauliques entre aquifères alluviaux et rivières Application au Rhône (Thèse de doctorat). Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, France.

FAYE B. (2004). Impacts des prélèvements sur les nappes de la presqu'île du Cap Vert et environs pour l'alimentation en eau potable de la ville de Dakar (Sénégal) (Mémoire de Master). Université Cheikh Anta DIOP (UCAD), Dakar, Sénégal.

Gachon, Aguiar, L. A. A., P. Gachon, M. Garneau and A. M. (2010). Variabilités interannuelles et intra-saisonnières des précipitations dans le littoral nord du Sénégal entre 1950 et 2004. Hydrological Sciences (Sous presse) 21(2): 97-104.

GOSSELIN J. S. (2016). Estimation de la recharge à partir de séries temporelles, de la température du sol, des niveaux d'eau dans les puits et de données météorologique: Développement méthodologique et évaluation de l'incertitude (Thèse de doctorat). Université du Québec, Canada.

Gratton Y. (2002). Le Krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale, Les articles de l'Institut d'Analyse Géographique.

GUEYE I. D. (2018). Suivi quantitatif et qualitatif des nappes dans les régions de Tambacounda et Kaffrine (Rapport de mission PSEA étiage 2018).

GUISADO A. (2015). Réalisation d'une carte piézométrique et interets dans la délimitation des aires d'alimentation de captages (Mémoire de stage). Université de Bourgogne, France.

Jean M. K., GBANGBOT G. S., KONAN K. E. (2019). Caractérisation lithologique et hydrodynamique de cinq puits dans le bassin sédimentaire de la région des lagunes, Sud-Est de la Côte d'Ivoire. Afrique Science, 15, Mars, 321-335.

Koïta, M., Sandwidi, W.J.P. and Dara, A.E. (2017) Recharge Estimation of Hard Rock Aquifers

- under Sahelian Climate Conditions Using Water Table Fluctuation: Case Study of Tougou Catchment, Burkina Faso. *Journal of Water Resource and Protection*, 9, 1428-1448. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2017.912092>.
- Kouassi A. M., Okaingni J. C., Kouakou K. E., Biemi J. (2013). Evaluation des propriétés hydrauliques des aquifères de socle cristallin et cristallophyllien: Cas de la région du N'zi-Comoé (Centre-Est de la Côte d'Ivoire). *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 1, Janvier, 61-71.
- Mahé G. and J. Olivry (1991). Changements climatiques et variations des écoulements en Afrique occidentale et centrale, du mensuel à l'interannuel. *AISH* 201: 163-171.
- MALOU Raymond. (1992). Etude des aquifères superficiels en Basse Casamance :Un modèle de bilan hydrique (Thèse de doctorat). Université Cheikh Anta DIOP, Dakar, Sénégal.
- Malunduma, 2019. Caractérisation hydrogéologique des aquifères du bassin de Taoudéni (bordure Sud Ouest, BURKINA FASO) (Mémoire de Master). Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), Ouagadougou, Burkina Faso.
- Matheron G. (1969). Le Krigeage Universel, Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau.
- MBOUTHIEU Joseph E. (2012). Essai d'optimisation des forages en milieu sédimentaire et de socle : Cas de la province du Seno dans la région du SAHEL au Burkina Faso (Mémoire de master). Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE), Ouagadougou, Burkina Faso.
- N'GUESSAN K., KOUASSI A., GNABOA R., TRAORÉ K.S., HOUENOU P.V. (2014). Analyse de phénomènes hydrologiques dans un bassin versant urbanisé :Cas de la ville de Yamoussoukro (centre de la Cote d'Ivoire). *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n°17, Mars 2014, pp. 135-154.
- Nièl G., H. MASSON J.M., PATUREL J.E., SERVAT E. (1998). Variabilité climatique et statistiques. Etude par simulation de la puissance et Variabilité climatique et statistiques. *Revue des Sciences de l'Eau*, Vol. 3, 383-408.

- Sanford, 2002. Recharge and groundwater models: an overview. *Hydrogeology Journal*, 10(1):110–120.
- Servat et al., 1998. E., PATU J.E., KOUAME B., TRAVAGLIO M., OUEDRAOGO M., BOYER J. F., LUBES-NIEL H., FRITSCH J.M., MASSON J.M., MARIEU B. (1998). Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et centrale. IAHS Publication, Vol. 252, 323-337.
- Sinan, M. & Razack, M. (2006). Estimation du champ de transmissivité d'un aquifère alluvial fortement hétérogène à partir de la résistance transversale. Application à la nappe du Haouz de Marrakech (Maroc). *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 19 (3), 221–232. <https://doi.org/10.7202/013540ar>.
- UNICEF. (2010). Etude de faisabilité des forages manuels : Identification des zones potentiellement favorables, Sénégal (Projet sur le Manuel drilling).
- ZADE S. G. P. (2011). Caractérisation hydrologique des sous bassins de la Sandougou en vue de la définition d'espaces de gestion et de valorisation des ressources en eau au profit des communautés (Mémoire de master). Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE). Ouagadougou, Burkina Faso.

ANNEXES

LISTE DES ANNEXES :

Annexe 1: Paramètres hydrogéologiques des aquifères du continental terminal et de l'oligo-miocène.	liv
Annexe 2: Cartes piézométriques.	lx
Annexe 3: Tableaux des données de forages (niveaux statiques et paramètres in-situ) situés dans la zone d'étude et résultats de l'analyse des échantillons.	lxvi
Annexe 4: Tableau de données pluviométriques des stations de Tambacounda-Kaffrine et algorithme pour la détermination de l'ETP.	lxxi

Annexe 1: Paramètres hydrogéologiques des aquifères du continental terminal et de l'oligo-miocène.

Désignation	TYPE_OUVRAGE	AQUIFERE	EpA (m)	Ns (m)	Q (m ³ /h)	Qs (m ³ /h/m)	T (m ² /min)
MISSIRAH	Forage	CT		13.8	16.40	3.76	
NGUINTH PEU	Forage	CT		49.97	25.80	4.09	
KOUMPENTOUM	Forage	CT	12.4	40.1			
NDIAWENE PE	Forage	CT		55.95	37.50	1.73	
SEANE	Forage	CT		57.62	66.00	4.46	0.01
DAROU SALAM	Forage	OM		63.82	21.60	0.75	
AINOUMANE	Forage	CT		53	44.00	1.25	
BALA FOULBE	Forage	CT		10.6	38.00	4.22	
BAMBA NDIAY	Forage	CT	47	49.83	19.50	7.67	
BANI ISRAEL	Forage	CT		9.98	54.00	11.38	
BOFFI (F53)	Forage	CT		43.83	33.50	5.19	
BOULEMBOU	Forage	CT		12.44	47.77	0.84	
BOULIMENGA	Forage	CT		50.08	68.13	3.4	0.01
DAGAYE GOUY	Forage	CT		58.37	50.00	10.55	0.02
DAROU FALL	Forage	CT		61.03	62.00	7.76	
DAROU FALL	Forage	CT		60.6	6.60	2.6	
DAROU KAFFA	Forage	CT		67.3	25.80	1	
DAROU NDIMB	Forage	CT		56.6	74.30	7.5	
DIAGLE SINE	Forage	CT		57.6	13.50	2.25	
DIAMAGADIO	Forage	CT		50.3	57.00	1.04	
DIAMAGUENE	Forage	CT		54.03	50.00	7.78	0.04
DIMISKHA	Forage	CT		58.2	46.50	4.55	
DIOKOUL MBE	Forage	CT		50.24	46.60	19.4	0.02
DIOLY MANDI	Forage	CT		37.29	51.00	11.13	0.09
DOUBA LAMPO	Forage	CT		28.06	36.00	11.88	
FASS NDIMBE	Forage	CT		58.1	42.80	2.99	
FOULA COLON	Forage	CT		45.6	65.14	19.37	
GOUDOUE DI	Forage	CT		37.37	45.00	6.12	

Caractérisation hydrogéologique des aquifères du continental terminal et de l'oligo-miocène dans la zone Tambacounda-Kaffrine (Sénégal)

Désignation	TYPE_OUVRAGE	AQUIFERE	EpA (m)	Ns (m)	Q (m ³ /h)	Qs (m ³ /h/m)	T (m ² /min)
GUERANE FAS	Forage	CT		64.8	55.42	11.4	
KATAKEL	Forage	CT		31.07	53.30	88.83	
KEUR LAMINE	Forage	CT		17.55	60.00	7.74	
KEUR MADOUM	Forage	CT		49.78	40.20	3.01	
KISSANG	Forage	CT		52.51	45.00	7.26	
KOUMPENTOUM	Forage	CT	42.63	36.5	35.00	4.13	
KOUNGHEUL E	Forage	CT		27.1	85.00	6.03	
MABO 1 (ESC	Forage	CT		38.32	46.20	22.68	
MADINA KEUR	Forage	CT		40.35	34.16	3.41	
MAKA BELAL	Forage	CT		48.17	62.99	33.3	
MAKA ESCALE	Forage	CT	34.36	26.61	59.00	4.23	
MAKA YOP	Forage	CT	69	62.88	47.00	8.08	0.01
MALEM HODDA	Forage	CT		51	59.86	6.7	
MALEMBA	Forage	CT		65.78	78.50	7.06	
MALEMBA	Forage	CT		66.81	68.37	6.25	0.01
MALEME HODA	Forage	CT	70	62.63	55.40	4.21	
MALEME NIAN	Forage	CT		57.03	50.00	13.51	
MBAROCOUNDA	Forage	CT		41.2	24.15	2.4	
MEDINA DEGO	Forage	CT		64.16	58.00	3.86	0.01
MEDINA DIAK	Forage	CT		21.05	20.00	0.33	
MEDINATOU D	Forage	CT		49.64	51.00	3.03	
MEDINATOU S	Forage	CT		41.4	50.00	2.06	
MERETO DIAL	Forage	CT	14.5	53.34	17.70	2.95	
MISSIRAH	Forage	CT		60.33	50.00	3.36	
NDIAMBOUR	Forage	CT		51.95	40.00	1.94	
NDIBA KOUKO	Forage	CT		37.77	29.20	2.8	
NGANDA	Forage	CT		50.37	55.00	5.64	
NGODIBA	Forage	CT		47.69	49.50	37.2	0.04
NIAHENE	Forage	CT	16	57.5	45.00	4.89	0.02
PATHE THIAN	Forage	CT		30.47	46.60	5.36	
PATHE THIAN	Forage	CT		30.35	60.00	5.48	
SALY ESCALE	Forage	CT	32	15.63	30.40	0.9	

Caractérisation hydrogéologique des aquifères du continental terminal et de l'oligo-miocène dans la zone Tambacounda-Kaffrine (Sénégal)

Désignation	TYPE_OUVRAGE	AQUIFERE	EpA (m)	Ns (m)	Q (m ³ /h)	Qs (m ³ /h/m)	T (m ² /min)
SAM NGAYENE	Forage	CT		53.93	80.00	2.7	0.01
SAMECOUTA P	Forage	CT		23.28	63.00	6.33	0.01
SAMECOUTA P	Forage	CT		21.66	13.30	6.48	
SAO SAOUCOU	Forage	CT		12.33	45.00	5.18	
SARE GUELEL	Forage	CT	66	53.65	9.00	1.13	
SINTHIOU GA	Forage	CT		56.47	52.20	7.51	
SINTHIOU MA	Forage	CT		19.1	74.60	8.24	
SITACOUROU	Forage	CT		26.07	65.45	1.82	
TAIBA (F52)	Forage	CT		19.05	45.00	3.13	
TEMEGNE	Forage	CT		51.98	44.00	2.91	
THIALENE	Forage	CT	7.2	43.72	24.30	2.5	
TOUBA CINE	Forage	CT		57.6	58.37	4.4	
TOUBA DAROU	Forage	CT		67.54	44.00	5.22	
TOUBA KAOSS	Forage	CT		50	53.08	8.2	0.02
TOUBA TERRE	Forage	CT		53.5	7.50	7.5	
VELINGARA K	Forage	CT		43.57	42.09	3.8	0.01
YOUPE HAMAD	Forage	CT		28.2	0.90		
KASSAS	Forage	CT		38.69	45.00		
MBENE DIOUM	Forage	OM	31	46.93	16.40	1.41	
MEDINA TAHI	Forage	OM		32.9	70.10	7.04	
AINOUMANE	Forage	OM		60.16	15.90	0.75	
BAMBA MODOU	Forage	OM		50.8	59.85	7.85	
BAMBACO	Forage	OM		32.68	61.89	2.85	
BAMBADINKA	Forage	OM		28.83	34.00		
BANTANKOUNT	Forage	OM	25	16.52	8.20	7	
DAROU MINAM	Forage	OM		72.35	18.24	2.81	
DAROU SALAM	Forage	OM	76	57.66	72.00		
DIAM DIAM D	Forage	OM		54.42	32.90		
DIAMAGUENE	Forage	OM		55.08	44.00		
DIAMGOULOR	Forage	OM		37.48	69.18	15.2	
DIENDE	Forage	OM		15.66	63.81	6.25	0.01
FADIACOUNDA	Forage	OM	91	15.25	40.00	7.4	

Caractérisation hydrogéologique des aquifères du continental terminal et de l'oligo-miocène dans la zone Tambacounda-Kaffrine (Sénégal)

Désignation	TYPE_OUVRAGE	AQUIFERE	EpA (m)	Ns (m)	Q (m ³ /h)	Qs (m ³ /h/m)	T (m ² /min)
FASS GOUNAS	Forage	OM		42.41	69.00		
GOULOUMBOU	Forage	OM	38.65	19.01	62.00		
KABA	Forage	OM		50.18	60.00	4.5	
KAOUSSARA	Forage	OM		50.58	28.50	1.38	
KEUR ALY LO	Forage	OM		22.26	46.60	1.9	
KEUR DAOUDA	Forage	OM	30	55.64	60.00	4.63	
KEUR MANOUM	Forage	OM		48.15	60.02	1.83	
KHOORDANE	Forage	OM		52.8	30.00		
KISSANG	Forage	OM		51.1	66.20	5.89	
KOO SOCE	Forage	OM		26.02	43.60	3.6	
KOUAR	Forage	OM		5.55	15.00	0.47	
KOUKOTO CIR	Forage	OM		36.17	15.30		
KOUNGHEUL S	Forage	OM		22.51	53.60		
KOUNTHIAO F	Forage	OM	87	21.24	12.00	2.88	
LOUANGA	Forage	OM		66.6	25.00	9.39	
MAKA GOUYE	Forage	OM		25.75	61.56	1.71	
MEDINA COLI	Forage	OM	19	59.2	50.00		
MEDINA FASS	Forage	OM	40	64.74	56.80		
MEDINA MBAY	Forage	OM		41.94	27.00	3.06	
MEDINA NIAN	Forage	OM		24.49	78.56	1.99	0.01
MEDINATOU S	Forage	OM		37.67	11.30	4.32	
MINAM	Forage	OM		52.323	33.00	2.7	
MISSIRA	Forage	OM		30.89	25.13	0.6	
MISSIRA KOU	Forage	OM		52.63	40.00	9.06	
MISSIRA OUM	Forage	OM		43.25	11.70	0.8	
MISSIRAH KO	Forage	OM	33	47.53	71.00		
MISSIRAH TH	Forage	OM		12.63	90.00	9.1	0.01
NDIAO BAMBA	Forage	OM	30	16.85	12.00		
NDIAPTO OUO	Forage	OM		20.03	36.40	1.62	
NDIAYE COUN	Forage	OM					
NDIOBENE	Forage	OM	31	46.32	45.00		
NGANTHILANE	Forage	OM		36.98	11.60	4.34	

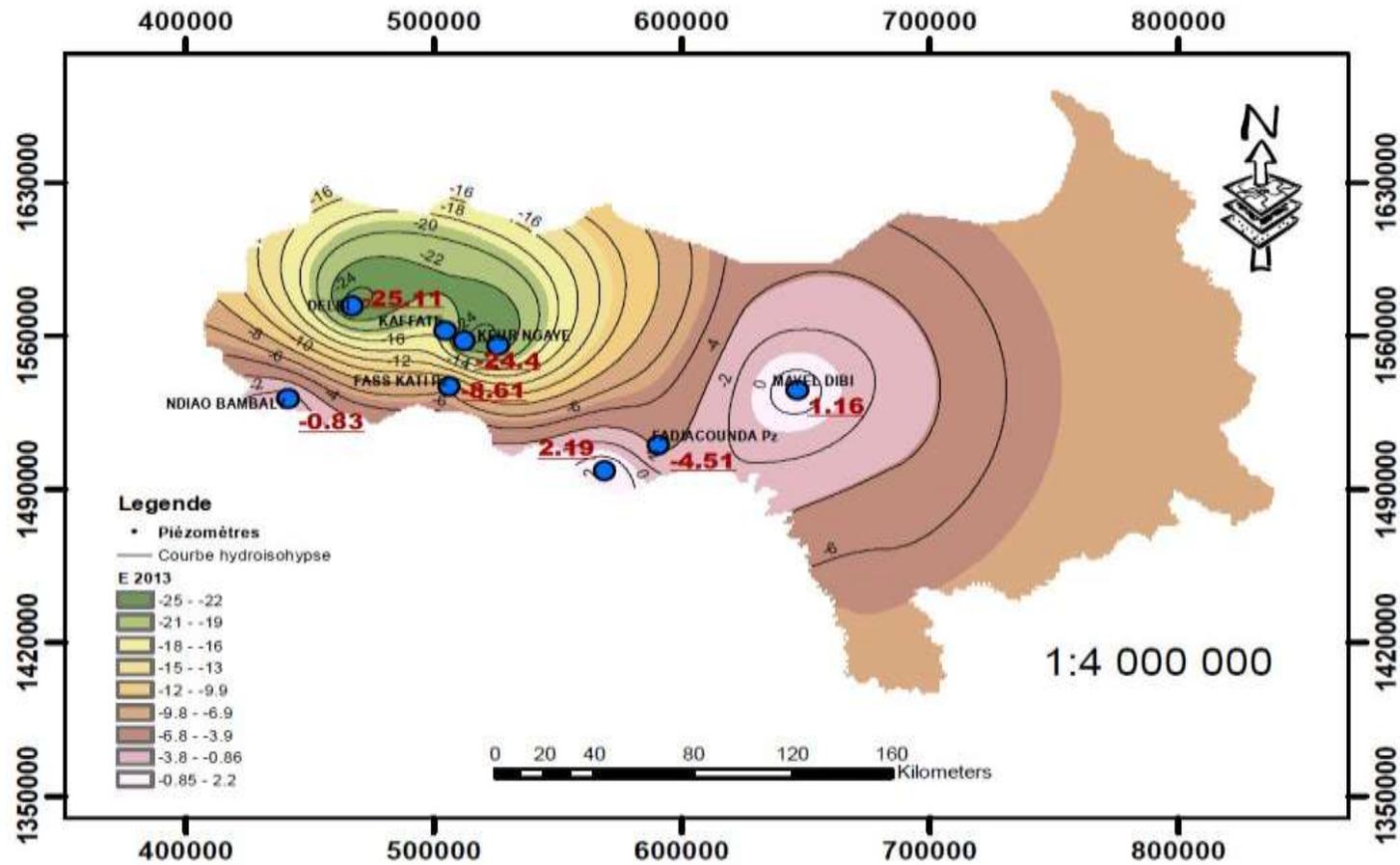
Caractérisation hydrogéologique des aquifères du continental terminal et de l'oligo-miocène dans la zone Tambacounda-Kaffrine (Sénégal)

Désignation	TYPE_OUVRAGE	AQUIFERE	EpA (m)	Ns (m)	Q (m ³ /h)	Qs (m ³ /h/m)	T (m ² /min)
NGODIBA	Forage	OM		43.08	39.53	7.93	0.09
PAKEBA	Forage	OM	84	14.93	12.90	4.32	
SARE BACOUN	Forage	OM		17.43	45.68	1.08	
SINTHIOU DE	Forage	OM	20	35.83	71.50	4.65	
SINTHIOU TA	Forage	OM	49	49.3	20.30		
SITAOULE MA	Forage	OM	70	32.16	11.30	1.01	
TAMBANDING	Forage	OM	21.91	29.2	35.70	4.32	
TINKOLI MAN	Forage	OM		35.62	12.00		
TOUBA THIAM	Forage	OM	2	30.5	50.00	6.12	
VELINGARA K	Forage	OM		42.08	10.30		0.01
WASSADOU DE	Forage	OM	45	46.28	48.84	2.32	
WOYE BOURE	Forage	OM		27.36	36.20	1.84	
DIOUGUEL	Puits-forag	OM		51.7	23.30	8.62	
BOHE BALEDJ	Forage	CT		54.3	30.60	2	
DAROU MANNA	Forage	CT		48.7	48.60		
DAROU WANAR	Forage	CT	35.96	23.9	75.00	3	0.07
KANTA	Forage	CT		52.88	30.00	1.44	
KOUSSANAR E	Forage	CT	10	26.05	70.00		
NDOUGOUSSIN	Forage	CT	58	34.25	36.00		
NGOUYE DIER	Forage	CT	21	60.37	19.35		
VELINGARA P	Forage	CT	22	8.3	17.00		
DAROU FANA	Forage	OM		54.84	38.90	5.3	
DAROU MBAYE	Forage	OM		53.2	37.00	3.6	
FASS KATI	Forage	OM		25.45	12.00		
HAMDALLAYE	Forage	OM		22.82	69.60		
KEUR SAMBA	Forage	OM		24.15	35.90	4.09	
KEUR YORO	Forage	OM		53.86	5.60	0.79	
KOUMBIDIA S	Forage	OM		19.93	54.60	6.4	
MINAL IBRA	Forage	OM		37.35	24.00	1.8	
PADDAH PEUL	Forage	OM		28.84	74.60	1.65	0.01
SEWERO	Forage	OM		47.6	55.71	1.65	0.01
SINTHIOU KA	Forage	OM		64.41	56.76	4.65	

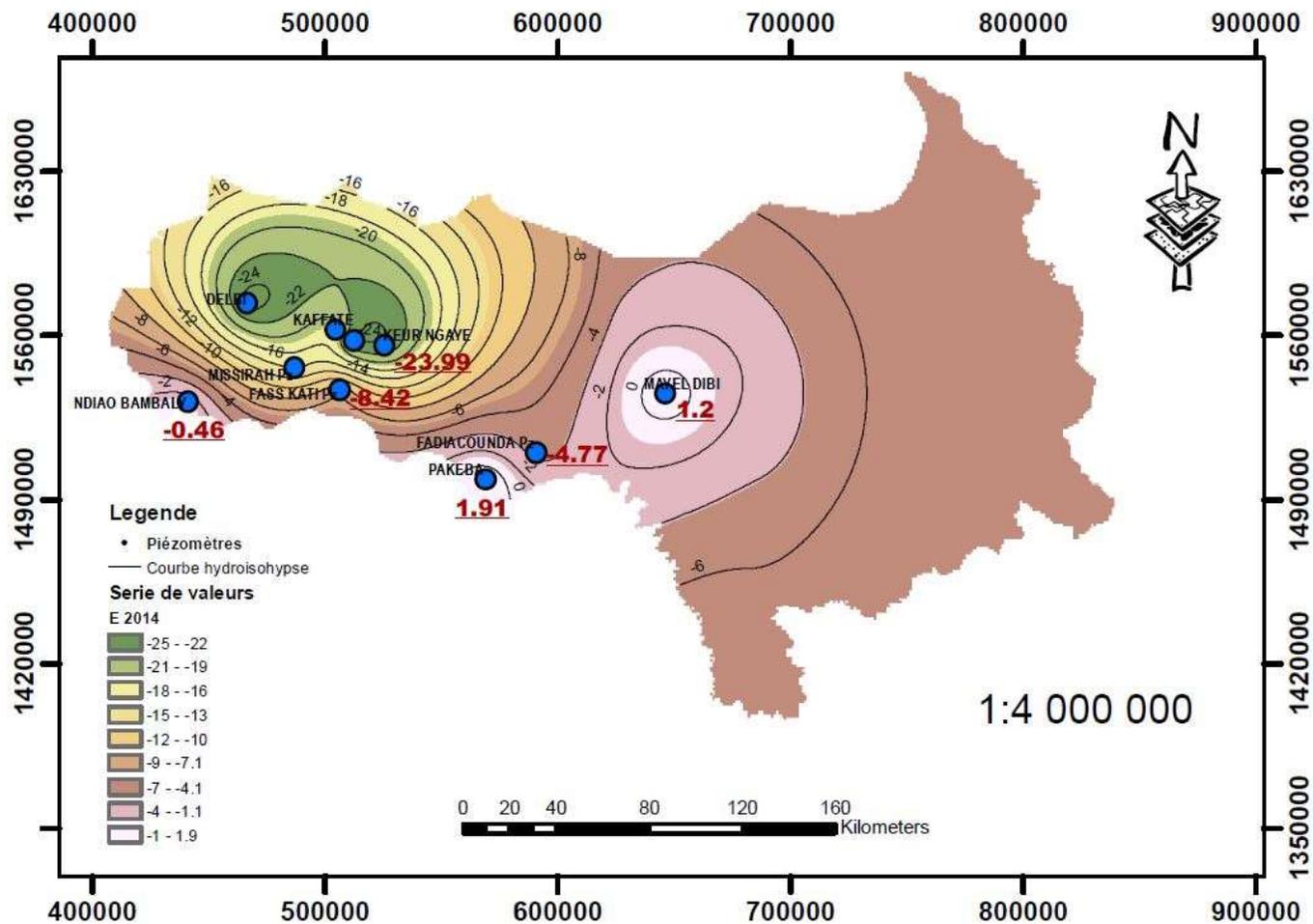
Caractérisation hydrogéologique des aquifères du continental terminal et de l'oligo-miocène dans la zone Tambacounda-Kafrine (Sénégal)

Désignation	TYPE_OUVRAGE	AQUIFERE	EpA (m)	Ns (m)	Q (m ³ /h)	Qs (m ³ /h/m)	T (m ² /min)
SQUARE COUN	Forage	OM		21.49	72.81	3.43	
THIARANGUEN	Forage	OM		15.07	30.47	0.88	
TOBENE MALI	Forage	OM		54.52	38.70	9.78	
MEDINA ABDO	Forage	CT		6.75	2.35	0.03	
SENO DIARAL	Forage	CT		66.7	13.42	2.31	
KOUMPENTOUM	Forage	CT		40.85	12.80	8.26	

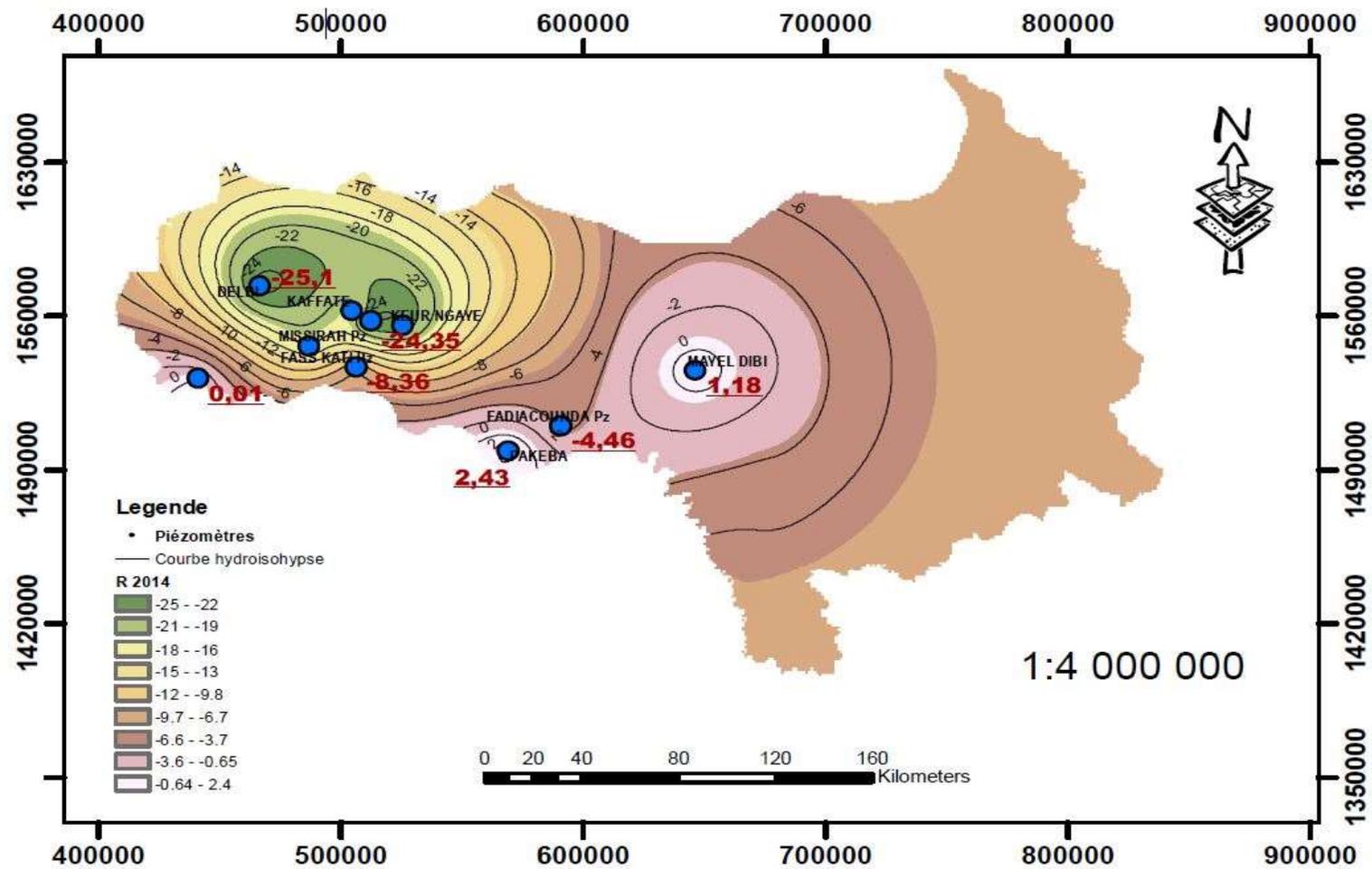
Annexe 2: Cartes piézométriques.



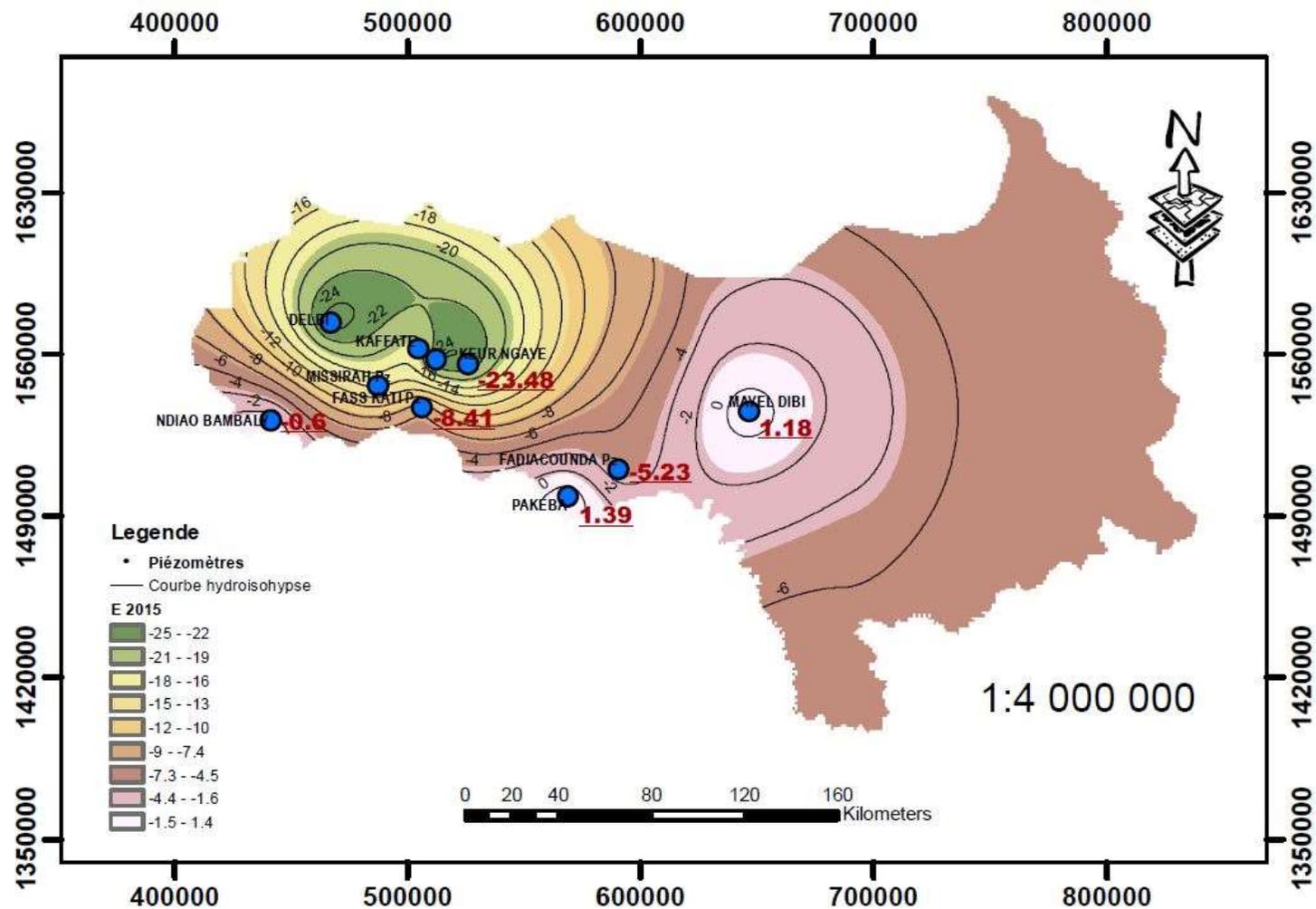
Carte piézométrique Étage 2013



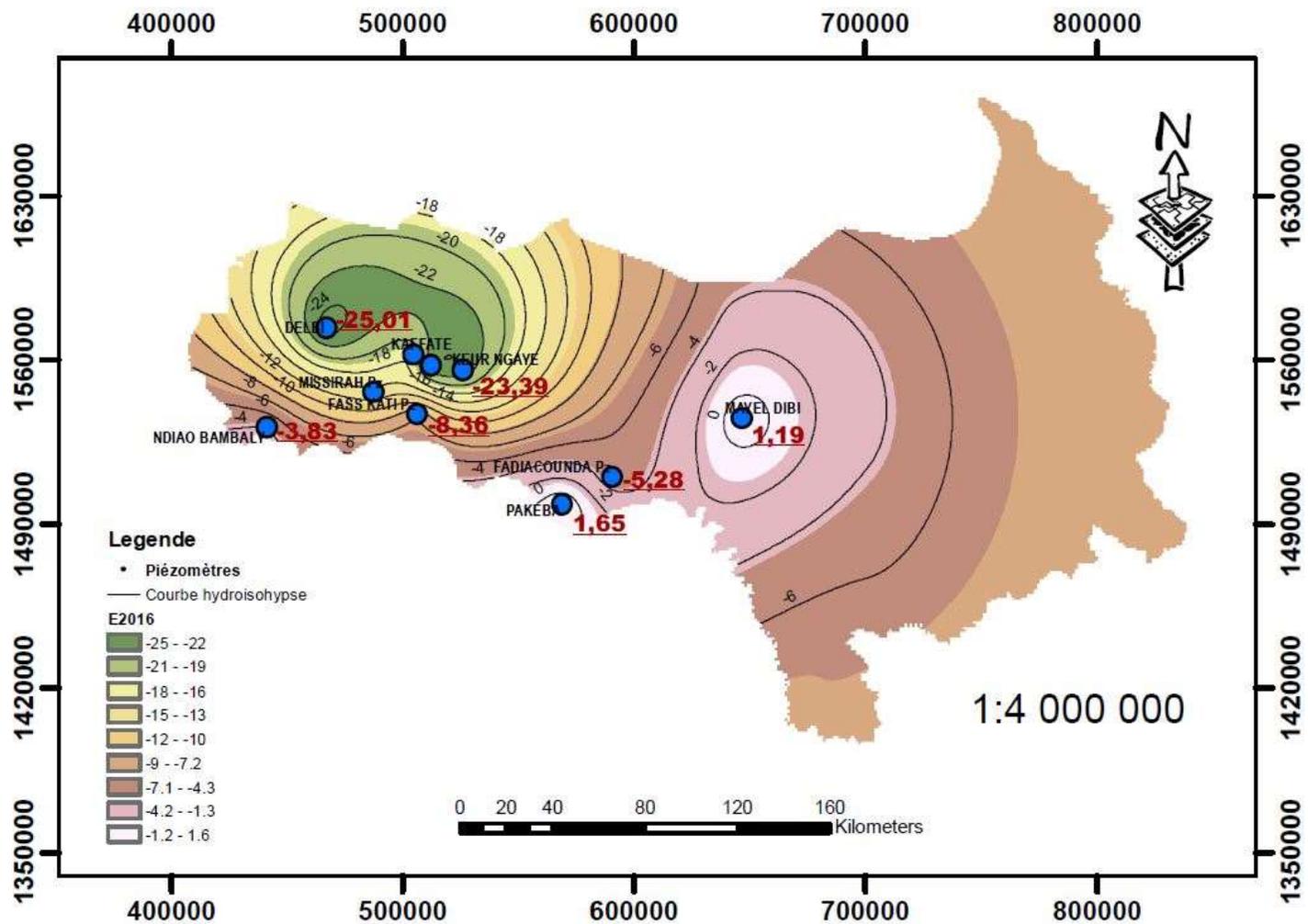
Carte piézométrique étiage 2014



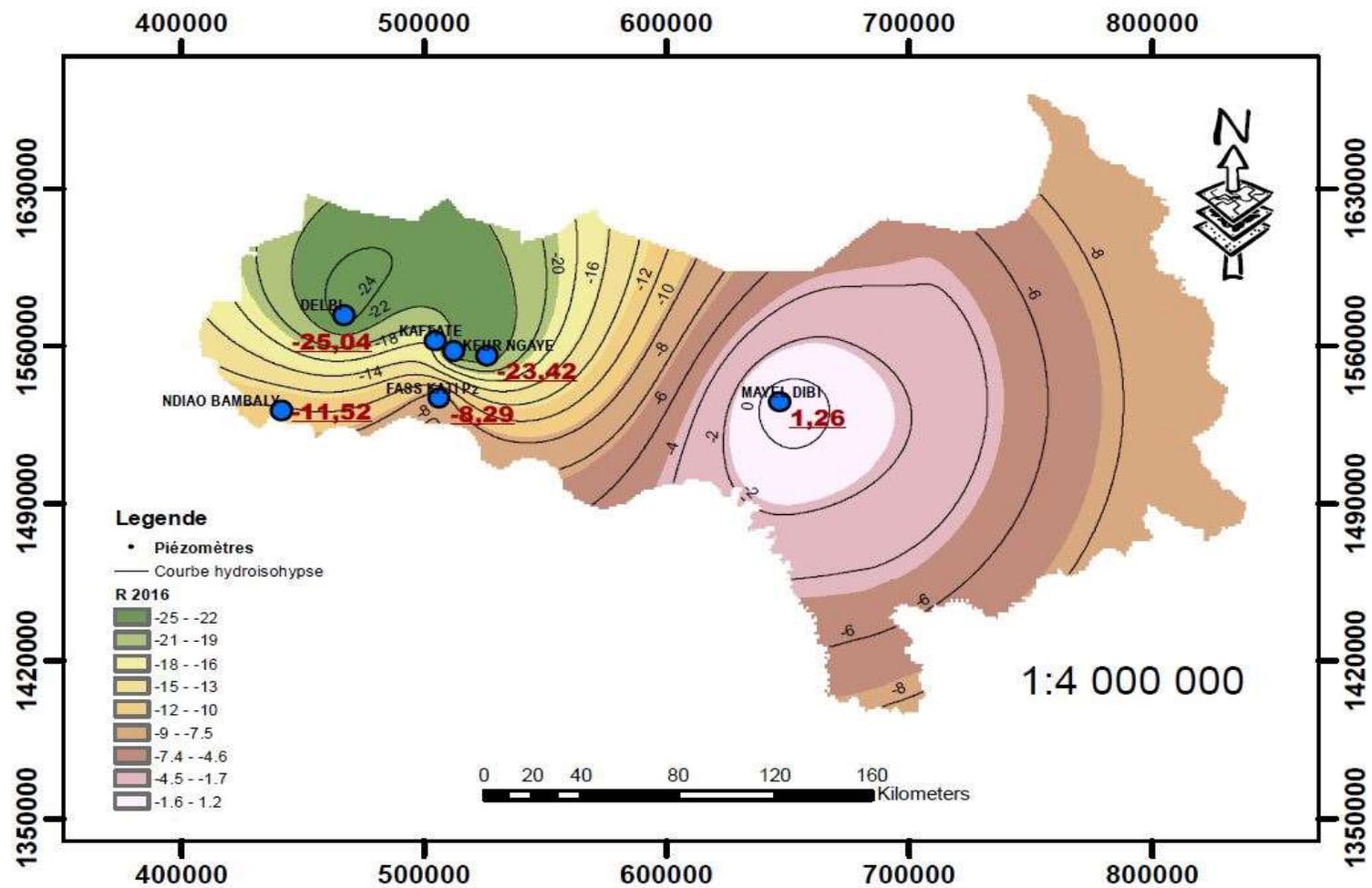
Carte piézométrique recharge 2014



Carte piézométrique étiage 2015



Carte piézométrique étiage 2016



Carte piézométrique recharge 2016

Annexe 3: Tableaux des données de forages (niveaux statiques et paramètres in-situ) situés dans la zone d'étude et résultats de l'analyse des échantillons.

Désignations	Aquifères	Ouvrages	NS	CE ($\mu\text{s/cm}$)	T°	pH	O2 (mg/l)	Observation
BALAMBOULOU	Maastrichtien	Piézomètre	16.8	251	31.3	9.6	4.3	
Balla	Maastrichtien	Forage	-	193	37	9.1	5.8	
Bani Israel	Maastrichtien	Forage	-	27.3	31.9	9.8	4.2	
BANTANANI	Continental Terminal	Puits	37.73	28.7	30.4	10	6.4	Niveau dynamique
BOHE BALEDJI	Continental Terminal	Forage	-	45.5	33.1	9.6	6.1	
BOULA	Maastrichtien	Piézomètre	37.06	136.4	32.1	8.64	5	
Boynguel Bamba_piezo	Maastrichtien	Piézomètre	53.03	-	-	-	-	on ne peut pas y prélever de l'eau
Darou Kaffat	Oligo- Miocène	Forage	-	152.2	34.1	8.8	6.5	
DARSALAM FODE (Darou salam)	Maastrichtien	Piézomètre	16.06	299	31.3	9.9	6.3	
DELBI	Oligo- Miocène	Piézomètre	37.21	390	32	7.8	4.6	
DIABA	Maastrichtien	Piézomètre	39.42	1562	31.5	9.05	4.48	
DIALAKOTO	Maastrichtien	Forage	-	568	34.6	10.06	5.58	
DIAMAGUENE	Maastrichtien	Piézomètre	48.65	620	32.5	9.44	5.26	
DINDEDJI	Maastrichtien	Forage	-	153	38.5	8.5	5.7	
FADIACOUNDA	Oligo- Miocène	Piézomètre	16.35	76.9	31.3	10.34	3.2	Niveau dynamique
FASS KATI	Oligo- Miocène	Piézomètre	22.88	189.8	32.1	9.32	4.9	

**Caractérisation hydrogéologique des aquifères du continental terminal et de l'oligo-miocène dans la zone
Tambacounda-Kaffrine (Sénégal)**

Désignations	Aquifères	Ouvrages	NS	CE ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	T°	pH	O2 (mg/l)	Observation
FETE NIEBE	Maastrichtien	Piézomètre	37.35	-	-	-	-	Préleveur trop grand
Gniby piézo	Paléocène	Piézomètre	54.37	910	33.2	9.12	4.4	
GONADE	Maastrichtien	Piézomètre	37.76	112.6	31.6	8.39	5.13	
GOUDIRI	Maastrichtien	Forage	-	50	32.1	8.6	6.7	
HONTORBE piezo	Maastrichtien	Piézomètre	42.08	332	32.6	8.15	5.38	
KAFFAT	Oligo- Miocène	Piézomètre	64.97	529	32.7	9	4.5	
KEUR GAYE	Oligo- Miocène	Piézomètre	60.57	361	32.3	9.9	5.3	
KEUR SASSY	Maastrichtien	Forage Puits	16.7	1427	36.7	9.1	5.6	
KOUNDIAO SOUAR	Maastrichtien	Forage Puits	27.32	195	32	10.44	5.7	Niveau dynamique
Mabo F	Maastrichtien	Forage	-	1704	31.2	7.8	6.3	
MAKA	Continental Terminal	Forage	26.32	106.3	31.4	10.24	6.5	
MAYEL DIBI	Oligo- Miocène	Piézomètre	20.29	362	31.6	10.22	4.8	
MEDINA MBADIAN	Maastrichtien	Piézomètre	42.61	542	32.4	9.01	4.4	
MEDINA OULOF_ dérel	Maastrichtien	Piézomètre	46.87	132	31	9.5	5	
Méréto Dialoubé	Maastrichtien	Forage	51.08	597	41.1	10.3	3.8	
MISSIRAH forage	Oligo- Miocène	Forage	58.88	41.3	34.3	9.04	8.2	Niveau dynamique
MISSIRAH Piezo	Oligo- Miocène	Piézomètre	58.11	-	-	-	-	Niveau dynamique : Huilé
Ndiao Bambali	Continental	Forage	-	278	30.2	7.9	7.2	

**Caractérisation hydrogéologique des aquifères du continental terminal et de l'oligo-miocène dans la zone
Tambacounda-Kaffrine (Sénégal)**

Désignations	Aquifères	Ouvrages	NS	CE ($\mu\text{s/cm}$)	T°	pH	O2 (mg/l)	Observation
	Terminal							
Ndiobène F	Oligo-Miocène	Forage	-	563	32.1	7.9	6.23	
NGALBASS	Maastrichtien	Piézomètre	43.66	601	35.7	10.22	3.24	
NGODIBA	Oligo-Miocène	Piézomètre	48.24	1058	31.5	7.8	4.6	Niveau dynamique
NGOUYE SIWAKH	Oligo-Miocène	Piézomètre	60.75	392	32.6	9	3.5	
NGUER MANDAKH	Maastrichtien	Forage	-	65	33	9.1	7.2	
NGUER MANDAKH piezo	Oligo-Miocène	Piézomètre	40	1033	31.3	8.5	4.89	
Niayel Waly	Maastrichtien	Forage Puits	25.69	1664	34	8.2	5.38	Niveau dynamique
PAKEBA	Oligo-Miocène	Piézomètre	13.96	43.3	31.7	10.5	3.7	
RIBO ESCALE	Maastrichtien	Piézomètre	23.64	474	32.4	9.5	4.6	
Sagna	Maastrichtien	Forage	-	223	33	8.5	6.5	
SAM GOUNASS	Maastrichtien	Piézomètre	38.67	215	32.8	8.18	5.2	
Sinthiou Bocar	Maastrichtien	Forage	-	408	44.5	9.9	3.2	
Sorocogne	Maastrichtien	Forage	-	1402	32.5	7.8	4.6	
Syll escal	Maastrichtien	Forage	-	547	40	10	3.42	

Résultats issus de l'analyse hydro-chimique des échantillons prélevés dans les forages de suivis (mg/l).

DESIGATION	pH	CE	RS	HCO3	Cl	SO ₄	NO ₃	Ca	Mg	Na	K	Fe	F	PO ₄
BANI ISRAEL	5.18	31	18	12.2	3.56	0.03	1.47	3.28	1.26	0.93	0.29	0.56		0.07956
BANTANANI Pt	5.2	32	18	12.2	3.85	1.31	0.55	3.5	0.69	0.92	0.41	0.03		0.0765
GOUDIRY	5.5	51	30	18.3	3.9	4.98	1.14	5.12	1.6	2.02	0.69	0.5		0.07038
MEDINA OULOF_ déerel	6.15	115	69	67.1	3.96	0.12	1.07	8.44	5.09	5.24	1.37	0.39	0.06	0.08568
BOYNGUEL BAMBA Pz	5.4	36	19	18.3	4.11	0.57	0.72	5.31	1.46	0.89	0.61	0.11		0.07956
FASS KATI Pz	6.21	60	35	30.5	4.17	0.06	0.61	6.93	2.18	2.37	1.69	4.98		0.07956
MISSIRAH F	5.72	47	28	24.4	4.97	0.08	0.9	5.97	0.86	2.03	0.5	0.49		0.06426
FADIACOUND A Pz	6.83	82	46	42.7	5.23	0.95	0.7	10.4	2.84	2.31	0.56	0.57		0.0765
BALLA	5.97	179	107	18.3	6.72	52.2	0.96	14.04	5.21	10.89	2.55	3.81	0.12	0.09486
SINTHIOU BOCAR ALI	7.72	410	269	219.6	7.23	32.79	0.67	53.6	12.4	13.11	4.02	0.45	0.18	0.0765
DAROU KAFFAT	7.05	155	92	91.5	7.28	1.71	0.69	17.82	5.78	3.49	1.23	0.23	0.04	0.09792
NDIOBENE	7.62	545	368	305	7.67	3.14	2.34	70.28	19.85	3.96	0.95	0.3	0.19	0.07956
SYLL ESCAL	7.84	535	357	292.8	7.94	39.07	5.76	47.43	13.69	46.04	2.41	0.45	0.19	0.07344

Caractérisation hydrogéologique des aquifères du continental terminal et de l'oligo-miocène dans la zone Tambacounda-Kaffrine (Sénégal)

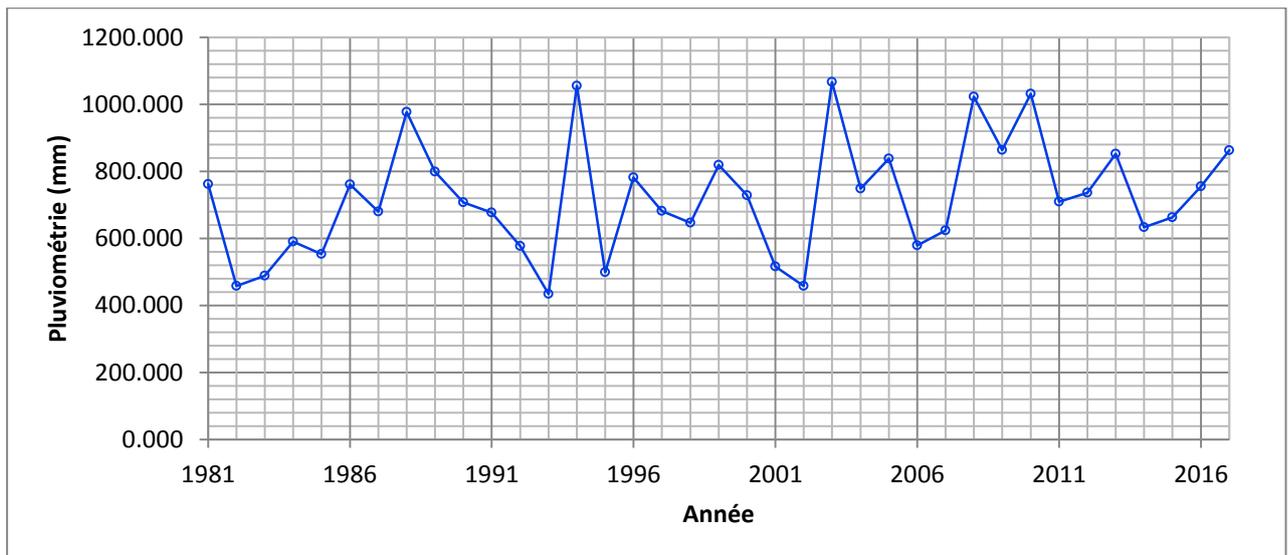
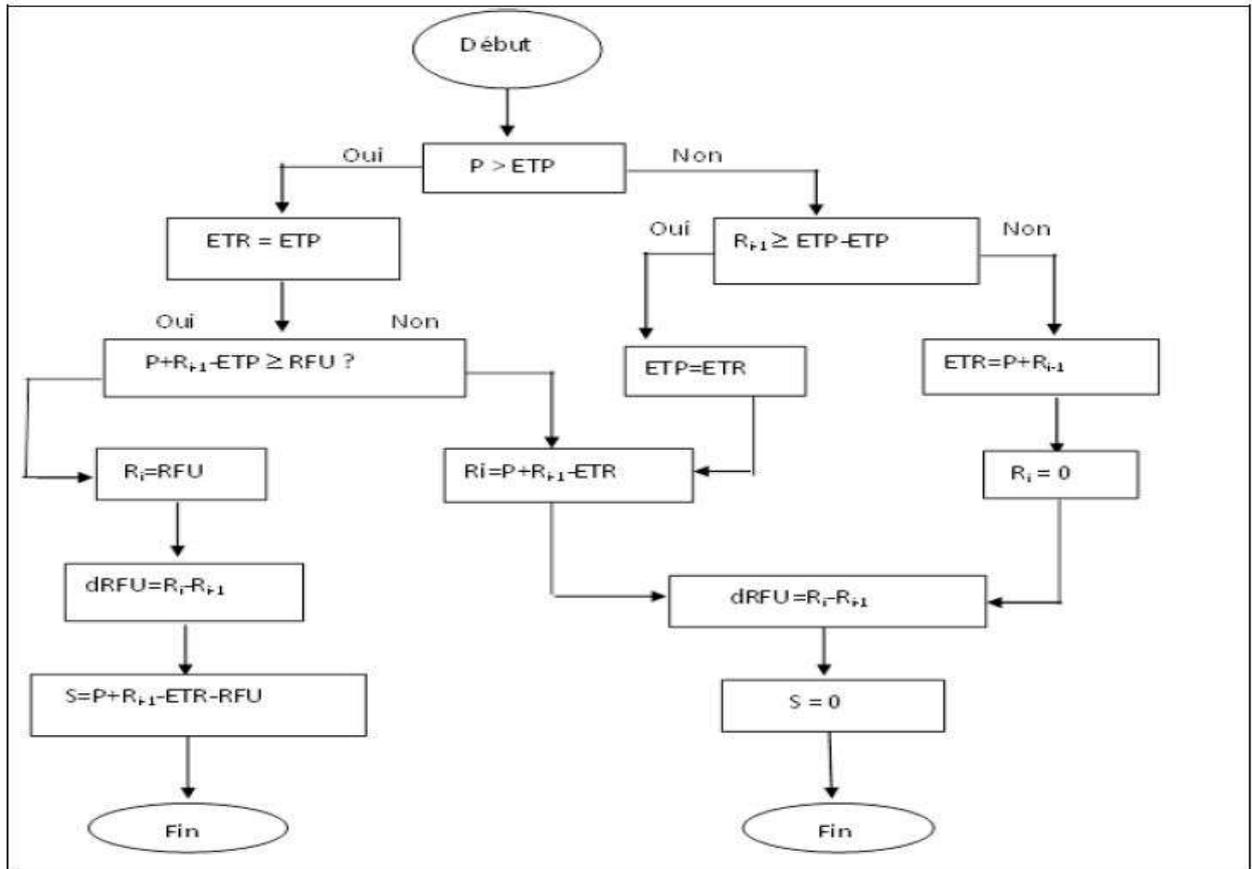
DESIGATION	pH	CE	RS	HCO ₃	Cl	SO ₄	NO ₃	Ca	Mg	Na	K	Fe	F	PO ₄
MAYEL DIBI	7.67	370	222	213.5	10.53	0.21	1.28	11.93	3.88	56.2	2.02	0.19	0.18	0.1040 4
DELBI	7.55	365	219	183	11.13	0.94	0.96	18.21	11.44	30.78	1.98	0.12	0.18	0.1101 6
MERETO DIALOUBE	8.02	560	389	305	18.73	47.81	1.34	32.29	6.84	72.81	6.43	0.18	0.22	0.0765
NDIAO BAMBALY	5.96	283	169	30.5	38.24	2.51	53.09	25	7.94	12.4	1.17	0.2	0.11	0.1009 8
GNIBI Pz	7.61	816	572	292.8	81.45	79.29	0.93	74.3	39.95	34.62	8.77	0.35	0.23	0.0979 2
SOROKOGNE F2	7.97	1430	998	305	255.51	90.8	7.89	8.14	4.28	300.5	8.72	0.41	2.97	0.1071
KEUR SASSY DIAMAGUENE	7.85	1450	1028	347.7	260.05	66.75	7.6	9.14	3.95	308.71	8.79	0.4	3.06	0.1254 6
NGODIBA	5.86	970	676	15.25	314.5	1.56	34.87	128.7	19.06	31.3	4.93	0.68	0.3	0.0979 2
NDIAYENE WALI	8.11	1700	1203	372.1	320.8	64.02	3.9	6.82	3.25	357.9	11.21	0.2	3.81	0.1101 6
MABO	8.06	1720	1202	390.4	359.37	65.52	4.49	12.57	4.93	375.49	9.86	0.19	3.77	0.1193 4

Annexe 4: Tableau de données pluviométriques des stations de Tambacounda-Kaffrine et algorithme pour la détermination de l'ETP.

Station Tambacounda		Station Kaffrine	
Année	P (mm)	Année	P(mm)
1981	761.6	1981	711.1
1982	458	1982	615.2
1983	488.7	1983	440.7
1984	590.1	1984	557
1985	553.6	1985	553.9
1986	761	1986	586.8
1987	679.6	1987	526.8
1988	976.8	1988	784.9
1989	798.7	1989	598.9
1990	707.8	1990	400.7
1991	677.4	1991	233.2
1992	576.7	1992	539.2
1993	433.6	1993	638.6
1994	1055.7	1994	723.6
1995	499.2	1995	444.6
1996	781.7	1996	538.6
1997	682.2	1997	457.5
1998	646.5	1998	427.1
1999	818.9	1999	827.8
2000	728.6	2000	646.9
2001	515.6	2001	678.4
2002	457.5	2002	518.4
2003	1066.7	2003	705.6
2004	748.4	2004	906.1
2005	838.2	2005	955.2
2006	578.9	2006	740.9
2007	624.1	2007	533.6
2008	1022.5	2008	709.4
2009	863.8	2009	642.7
2010	1031.3	2010	1195.1
2011	709.1	2011	667.9
2012	736.4	2012	834.8
2013	852.5	2013	780.7
2014	632.8	2014	442.7
2015	663.1	2015	834.7
2016	755.4	2016	855.4

**Caractérisation hydrogéologique des aquifères du continental terminal et de l'oligo-miocène dans la zone
Tambacounda-Kaffrine (Sénégal)**

2017	862.9	2017	531.4
------	-------	------	-------



Evolution de la pluviométrie à Tambacounda (1981-2017).

