



Original

Ministère de l'hydraulique et de l'assainissement

Programme d'Eau Potable et d'Assainissement du Millénaire



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



Étude hydrogéologique de la nappe des sables alluvionnaires entre Bakel et Kidira & l'étude hydrologique de la Falémé dans la Zone de Kidira

Rapport final de l'étude

Août 2015

Num. Livrable	[L1-V0]				
Rédaction	Vérification	Validation	Approbation	Date	Objet révision
<ul style="list-style-type: none">Pr Serigne FAYE,Dr Honoré Dacosta,Dr Same DIOUF,Samba Laobé NDAOIbrahima BA	<ul style="list-style-type: none">Ndiaga DIOP	<ul style="list-style-type: none">Ousseynou DIOP	Mamadou DAFÉ	04 Août 2015	Version définitive
	Août 2015	Août 2015	Août 2015		

Groupement IDEV-ic / ARTELIA

Patte D'oie Builders villa B11&D11 / BP 8316 Dakar – Yoff (Sénégal) /
Email : idev-ic@idev-ic.sn / agrosol@orange.sn, Tel. (221) 33 855 95 90 / 91 / 93 – Fax : (221) 33 855 95 92

Table des Matières

TABLE DES MATIERES	6
ACRONYMES	8
LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES	9
1. INTRODUCTION	10
1. RAPPEL DE LA MISSION	11
1.1. OBJECTIF GLOBAL.....	11
1.2. OBJECTIFS SPECIFIQUES.....	12
1.3. RESULTATS ATTENDUS	12
1.4. METHODOLOGIE ET PLAN DE TRAVAIL ADOPTE	12
2. BILAN DES ETUDES HYDROGÉOLOGIQUES ET CHOIX D'IMPLANTATION DES FORAGES ET DES PIEZOMETRES.....	14
2.1. CONTEXTE GEOGRAPHIQUE, GEOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE.....	14
2.1.1. Localisation de la zone d'étude	14
2.1.2. Géologique et hydrogéologique de la zone d'étude	15
2.1.2.1 Géologique de la zone	15
2.1.2.2 Hydrogéologie de la zone d'étude	16
2.2. ACQUIS DES INVESTIGATIONS HYDROGÉOLOGIQUES DE LA NAPPE DES SABLES ALLUVIONNAIRES ENTRE BAKEL ET KIDIRA	17
2.2.1. Résultats cartographiques	17
2.2.2. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS DES DONNÉES HYDROGÉOLOGIQUES	20
2.2.2.1 Configuration géométrique	20
2.2.2.2 Configuration de l'écoulement- relation nappe/eau de surface.....	27
2.2.2.3 Caractéristiques hydrodynamiques.....	31
2.2.2.4 Caractéristiques hydrochimiques.....	32
2.2.2.5 Caractéristiques physico-chimiques	32
4 CHOIX DES SITES D'IMPLANTATION ET CONCEPTION DU CAPTAGE	39
3. BILAN DES ETUDES HYDROLOGIQUES - BATHYMETRIE DE LA POCHÉ DE FABOLI	40
3.1. DONNÉES DE BASE	40
3.2 ANALYSE DES ÉCOULEMENTS.....	40
3.2.1 Écoulements annuels et interannuels	40
3.2.2 Répartition mensuelle des écoulements	42
3.2.3 Caractérisation des débits journaliers	44
3.2.4 Les débits caractéristiques de crue et d'étiage	45
3.3. BATHYMETRIE DE LA POCHÉ DE FABOLI	47
3.3.1. Analyse des résultats	48
3.3.2 Gestion de la poche, potentiel mobilisable et recommandations	53
3.4 BESOIN EN AEP	54
3.5 ANALYSE DES RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	54
3.6 RISQUES DE DEGRADATION DE LA QUALITE DES EAUX DE SURFACE	54
3.7 RECOMMANDATIONS ET SCENARII.....	55
4. BILAN DES RESULTATS DU MODELE.....	56
4.1 MODELE CONCEPTUEL	56

4.2 IMPLEMENTATION DES DONNEES D'ENTREE DU MODELE.....	59
4.2.1 Débits prélevés.....	59
4.2.2 Géométrie du toit et du mur.....	59
4.2.3 Paramètres hydrauliques.....	59
4.2.4 Recharge.....	59
4.2.5 Piézométrie de référence.....	60
4.3. CALAGE HYDRODYNAMIQUE ET ANALYSE DES RESULTATS	60
4.4. EXPLOITABILITE – POTENTIALITES	62
4.5 PROGRAMME DE SUIVI.....	63
5. RESULTATS PRELIMINAIRES DES NOUVEAUX OUVRAGES	64
6. CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS	66
7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	68

Acronymes

AEP:	Approvisionnement en Eau Potable
CE:	Conductivité Electrique
DGPRE:	Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en Eau
DTGC:	Direction de Travaux Géodésiques et Cartographiques
NS:	Niveau Statique
NP:	Niveau Piézométrique
OMD:	Objectifs du Millénaire pour le Développement
PASMI :	Programme d'Appui au Secteur Minier
PEPAM:	Programme d'Eau Potable et d'Assainissement du Millénaire
pH:	Potential Hydrogène
Q :	Débit
Qs:	Débit spécifique
PROGRES	Programme de Gestion des Ressources en Eau du Sénégal
ROM :	Rapport d'Orientation Méthodologique
RS:	Résidus Secs
s:	rabattement
SE:	Sondage Electrique
T :	Transmissivité
TDR :	Terme de références
T°:	Température
UCAD:	Université Cheikh Anta Diop
UEMOA :	Union Economique et Monétaire Ouest Africaine

Liste des tableaux et Figures

Tableau 1:	Comparaison des valeurs de NS et NP des 2 campagnes.....	31
Tableau 2:	Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère	31
Tableau 3:	Statistique descriptive des valeurs de paramètres physico-chimiques	33
Tableau 4:	Statistique descriptive des concentrations en ions mesurées	35
Tableau 5:	Site potentiel d'implantation des forages	39
Tableau 6 :	Modules annuels moyens et écart-types des aux stations hydrologiques de la Falémé.....	40
Tableau 7 :	Bassin versant de la Falémé-Débits mensuels moyens (m ³ /s) à Moussala, Fadougou, Gourbassi et Kidira	43
Tableau 8 :	évolution des dolumes d'eau en fonction des cotes de plan d'eau	51
Tableau 9 :	bilan des prélèvements sans ou avec projet SAED	53
Tableau 10 :	Estimation des besoins en AEP	54
Tableau 11 :	Bilan hydrique calculé en m ³ /j.....	62
Tableau 12 :	Bilan hydrique après simulation	63
Tableau 13 :	Résultats des tests de pompages dans les nouveaux ouvrages.....	65
Figure 1:	Localisation de la zone du projet.....	14
Figure 2:	Contexte géologique (extrait de la carte feuille Bakel-Semme Sud-Ouest / PASMI).....	16
Figure 3:	Schéma conceptuel de configuration d'aquifères de socle	17
Figure 4:	Carte morphopédologique de la zone du projet	18
Figure 5 :	Carte d'occupation des sols.....	19
Figure 6 :	Coupe géo électrique longitudinale dans la zone de Bakel à Balou	25
Figure 7 :	Coupe géo électrique 2 Ballou - Kidira	26
Figure 8 :	Coupe géo électrique 1 Kidira - Alehina.....	26
Figure 9 :	Carte de distribution des valeurs mesurées de CE de la campagne 2	34
Figure 10 :	Carte de distribution des concentrations en NO ₃ (mg/l)	36
Figure 11 :	Corrélation NO ₃ vs Cl	36
Figure 12 :	Typologie des eaux issues de la campagne 1	37
Figure 13 :	Typologie des eaux issues de la campagne 2	38
Figure 14 :	Aptitude des eaux à l'irrigation	38
Figure 15 :	Bassin versant de la Falémé – Variations des modules (m ³ /s) de la Falémé à Moussala de 1903 à 2012.	41
Figure 16 :	Bassin versant de la Falémé – Variations des modules (m ³ /s) de la Falémé à Fadougou de 1903 à 2012.	41
Figure 17 :	Bassin versant de la Falémé – Variations des modules (m ³ /s) de la Falémé à Gourbassi de 1903 à 2012.	41
Figure 18 :	Bassin versant de la Falémé – Variations des modules (m ³ /s) de la Falémé à Kidira de 1903 à 2012.	42
Figure 19 :	Débits mensuels moyens (m ³ /s) à Moussala, Fadougou, Gourbassi et Kidira	44
Figure 20 :	Variations des débits journaliers et comparaison des hydrogrammes de 4 années hydrologiques à la station de Gourbassi.	45
Figure 21 :	Variations des débits journaliers et comparaison des hydrogrammes de 4 années hydrologiques à la station de Kidira.	45
Figure 22 :	Débits caractéristiques de crues et d'étiages de Moussala, Fadougou, Gourbassi et Kidira	46
Figure 23:	Carte de présentation de la poche de Faboli	47
Figure 24 :	Image prise d'écran de la représentation bathymétrique (tronçon de 2,1 kilomètres de long), avec échelle de profondeur en mètres	48
Figure 25 :	profil transversal dans la poche de Faboli	49
Figure 26 :	Courbe Cote (m)-Volume(M ³) de la poche de Faboli	51
Figure 27:	Comparaison niveau seuil aval de Faboli aux cotes IGN de la station de Kidira pour plusieurs années.	52
Figure 28 :	Comparaison niveau seuil aval de Faboli aux cotes IGN de la station de Kidira pour l'année 1994.....	53
Figure 29:	Modèle conceptuel retenu et discrétisation du domaine d'étude (les cellules de couleur blanche, verte et bleue représentent respectivement les cellules actives, inactives et les cellules de condition rivièrè).....	58
Figure 30:	Carte piézométrique calculée par le modèle (isopièzes en ligne bleue et vecteur vitesse d'écoulement en flèche verte)	61
Figure 31:	Comparaison entre données piézométriques mesurées et calculées	62
Figure 32:	carte piézométrique après simulation (isopièzes en bleu et vecteur vitesse en vert)	63

1. INTRODUCTION

Le présent rapport, est produit au titre de "**Rapport de synthèse**", conformément aux termes de référence de l'étude portant « Etude hydrogéologique de la nappe des sables alluvionnaires entre Bakel et Kidira et Etude hydrologique de la Falémé dans la zone de Kidira ». Il synthétise le contenu des rapports finaux portant sur :

- L'étude hydrogéologique de la nappe des sables alluvionnaires entre Bakel et Kidira;
- L'étude hydrologique de la Falémé dans la zone de Kidira ;
- Le modèle mathématique.

Le rapport de synthèse est articulé autour des points suivants :

- la présentation de la mission, ses objectifs, les résultats attendus et les activités à conduire par le consultant ;
- le bilan des études hydrogéologiques et le choix d'implantation des forages et des piézomètres;
- le bilan des études hydrologiques
- les résultats du modèle numérique
- les résultats préliminaires des travaux de réalisations de 10 ouvrages

1. RAPPEL DE LA MISSION

Le Sénégal a défini le PEPAM comme cadre programmatique permettant l'atteinte des OMD en matière d'accès à l'eau potable et à l'assainissement. Cet engagement doit se traduire entre 2005 et 2015 par la réduction de moitié de la population n'ayant pas accès à l'eau potable. A ce titre, des investissements importants ont été réalisés en vue d'assurer la desserte en eau potable des populations.

Dans ce cadre, la Banque Mondiale a décidé d'appuyer l'État du Sénégal en vue de l'atteinte des OMD à travers le financement du sous-programme PEPAM IDA mis en œuvre depuis 2011. Ce sous-programme intègre dans sa composante « Hydraulique Rurale » la réalisation de nouvelles adductions d'eau multivillages et la réalisation d'investissement visant à optimiser l'exploitation et la gestion des adductions existantes par la densification et l'extension des réseaux, la réalisation d'ouvrages de stockage surélevés et le redimensionnement et l'optimisation des systèmes d'exhaure.

Le sous-programme comporte par ailleurs, la réalisation de systèmes de production basées sur le traitement des eaux de surface et le transfert d'eau à petite échelle en guise de réponse à la problématique de l'accès dans les zones présentant des ressources en eau souterraines insuffisantes (zone de socle) ou impropres à la consommation (nappes salées de la vallée du fleuve Sénégal).

Pour assurer une couverture suffisante des besoins en eau potable des localités situées dans la zone d'intervention du sous-programme, notamment en zone de socle caractérisée par une rareté des ressources souterraines, une alternative consistant à capter et à traiter les eaux superficielles (de surface ou souterraines) peut être envisagée. La mise en œuvre de ces options nécessite cependant une meilleure connaissance des disponibilités en ressources en eau et du comportement des aquifères.

Ainsi, dans le cadre du Sous-programme PEPAM-IDA, la DGPRE a décidé de mener une étude des ressources en eau de surface et des ressources souterraines superficielles dans la zone de Kidira, sur une partie de la Falémé, en vue de proposer des options de captage et de valorisation pérenne assurant une desserte correcte des populations et préservant les ressources mobilisables. Cette mission a été confiée au groupement IDEV-ic/Artelia dans le cadre du contrat NC-1205/2014 en date du 25 juillet 2014.

1.1. Objectif global

L'objectif général visé par la mission est d'améliorer les connaissances sur les réserves hydriques de la nappe des sables alluvionnaires le long du fleuve Sénégal et de la Falémé dans le département de Bakel et des ressources en eau de surface de la poche pérenne de Faboli en vue de leur exploitation optimale pour l'AEP des population de la zone d'intervention. En effet, la situation de la zone concernée se caractérise par l'insuffisance des connaissances sur les ressources en eau souterraine et une méconnaissance des relations hydraulique nappe/cours d'eau.

Les quelques ouvrages (puits ou forages) exploitant ces sables aquifères tarissent en période d'étiage (notamment à Kidira) et amènent les populations à utiliser les eaux de surface non traitées comme eau de consommation. De plus, le régime de la Falémé marqué à certains endroits par l'absence d'écoulement durant une partie de l'année, rend précaire l'accès à l'eau à partir des ressources de surface et justifie la valorisation des poches d'eau pérennes dont les potentialités ne sont pas connues et maîtrisées

1.2. Objectifs spécifiques

Pour atteindre l'objectif global, le consultant devra au préalable réaliser les objectifs spécifiques suivants :

- Identifier et caractériser la nappe des sables alluvionnaires situé le long du fleuve Sénégal et de la Falémé dans le département de Bakel à partir d'études et de prospections géophysiques et hydrogéologiques ;
- Caractériser l'hydrologie de la Falémé et du fleuve Sénégal dans sa partie située dans le département de Bakel, notamment de la poche d'eau pérenne de Faboli ;
- Construire un modèle simplifié et des outils permettant une gestion prévisionnelle des ressources et d'étudier les interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines ;
- Analyser l'exploitabilité des ressources en eau souterraines et des ressources en eau de surface en vue de conclure sur la faisabilité des infrastructures permettant un accès durable à l'eau potable.

La mission consiste donc à réaliser, pour le compte de la Direction de la Gestion et de la Planification des Ressources en eau (DGPRE), les études hydrogéologiques de la nappe des sables alluvionnaires allant de Bakel sur le Fleuve Sénégal à Bountou sur la Falémé en passant par Aroundou (confluent Falémé-Fleuve Sénégal) et Kidira.

Elle vise aussi à assurer les études hydrologiques sur une partie de la Falémé constituée par la poche d'eau pérenne de Faboli, dans la zone de Kidira.

1.3. Résultats attendus

Les résultats attendus de la mission devraient permettre de disposer :

- Des données quantitatives et qualitatives sur les ressources en eau souterraine superficielle situées dans la nappe des sables alluvionnaires ;
- D'une caractérisation des ressources en eau de surface de la Falémé, notamment de la poche d'eau pérenne de Faboli dans la perspective d'un approvisionnement durable en eau des populations et aussi d'une définition des aménagements complémentaires y relatifs ;
- D'un modèle simplifié ainsi que des outils permettant une gestion prévisionnelle des ressources et d'étudier les interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines ;
- Et d'un plan de gestion et d'utilisation des ressources en eau disponibles en vue de faciliter l'accès à l'eau des populations, respectant l'environnement et conforme aux principes de la GIRE.

1.4. Méthodologie et plan de travail adopté

Pour l'exécution des prestations, le Groupement IDEV-ic/Artelia a mobilisé une équipe pluridisciplinaire comprenant un hydrogéologue, spécialiste en GIRE et en modélisation, un hydrologue, un géophysicien et un spécialiste en cartographie. Cette équipe d'experts a été secondée un personnel d'appui technique composé d'un expert en gestion des ressources naturelles et de l'environnement comme chef de projet, d'un hydrologue pour le contrôle et l'assurance qualité des prestations, d'un ingénieur en sciences des eaux et de la météorologie en appui à l'hydrologue, d'un technicien supérieur en topographie pour les travaux de nivellement et d'un technicien supérieur en cartographie.

La mission s'est déroulée en plusieurs phases :

Phase 1 : mobilisation des experts – analyse de données existantes

Elles portent sur la mobilisation des experts, la prise de contact et la réunion avec le maître d'œuvre. L'activité de mobilisation de l'équipe a démarré juste après la signature du contrat et a permis de confirmer la disponibilité des experts proposés et de les informer sur les modalités de démarrage de la mission.

Des activités de collectes de données documentaires consistant à compléter les données analytiques des projets et études antérieurs dans la zone du projet et celles qui ont résulté des investigations de terrain

Durant cette phase, une mission de reconnaissance de terrain a été effectuée pour s'informer de l'état des lieux et le recueil de données au niveau des services décentralisés. Cette mission a permis de concevoir le plan de travail de la phase 2 qui a fait l'objet du rapport R)01 portant sur le ROM.

Phase 2 : investigations hydrogéologiques et hydrologiques

Durant cette phase, l'ensemble des investigations hydrogéologiques, géophysiques, hydrologiques cartographiques et de nivellement s'est déroulé. Elle a permis l'acquisition des données de base pour l'interprétation du fonctionnement hydrogéologique et hydrologique du système pouvant être utilisées en particulier dans la phase de modélisation. Ces données analytiques ont d'abord permis d'établir le modèle conceptuel de fonctionnement du système.

Phase 3 : travaux de modélisation :

Sur la base des informations tirées des investigations et de la compréhension du fonctionnement du système, un modèle hydrodynamique simplifié a été conçu, calibré et des simulations effectuées pour analyser le potentiel exploitable.

Phase 4 : travaux de réalisation des ouvrages programmés dans la cadre du projet

Le groupement a été chargé d'identifier en accord avec le client les sites et de concevoir les coupes techniques prévisionnelles des ouvrages. Il faut retenir que ces travaux non seulement ont démarré tard mais également le temps d'exécution a été plus long que prévu du fait de contraintes techniques au niveau de l'entreprise KRG. D'autre part, le groupement n'avait pas la mission de superviser les travaux.

Cette phase 4 se termine par l'élaboration du rapport de synthèse qui reprend en fait les principaux acquis et conclusions issus des investigations des phases précédentes.

Les investigations décrites ci haut ont été menées suivant une démarche participative inclusive avec le client pour permettre un ancrage institutionnel au niveau de la DGPRE – et la validation des rapports sectoriels avec le comité technique mis en place par le client.

2. BILAN DES ETUDES HYDROGÉOLOGIQUES ET CHOIX D'IMPLANTATION DES FORAGES ET DES PIEZOMÈTRES

2.1. Contexte géographique, géologique et hydrogéologique de la zone d'étude

2.1.1. Localisation de la zone d'étude

La zone du projet s'étend de Bakel sur le Fleuve Sénégal à Bountou sur la Falémé en passant par Aroundou (confluent Falémé/Fleuve Sénégal) et Kidira. Elle couvre l'extension des dépôts alluvionnaires et environs sur les terrains de socle. De Bountou à Senedebou, elle est en territoire sénégalais et couvre les rives gauche et droite ; au-delà vers Aroundou sur la Falémé et de Aroundou à Bakel le long du fleuve Sénégal, seule la rive gauche est prise en compte dans la zone du projet du fait que la rive droite se situe en territoire malien et mauritanien (Fig.1).

Toutefois, pour les besoins du modèle, la zone d'étude a été étendue au-delà des alluvions en prenant en compte une partie de l'aquifère fracturé du fait que les alluvions ne présentent pas d'intérêt hydrogéologique sur une grande partie de la région. La zone d'étude est peu peuplée avec 35 villages dénombrés à l'exception des villes de Bakel et de Kidira.

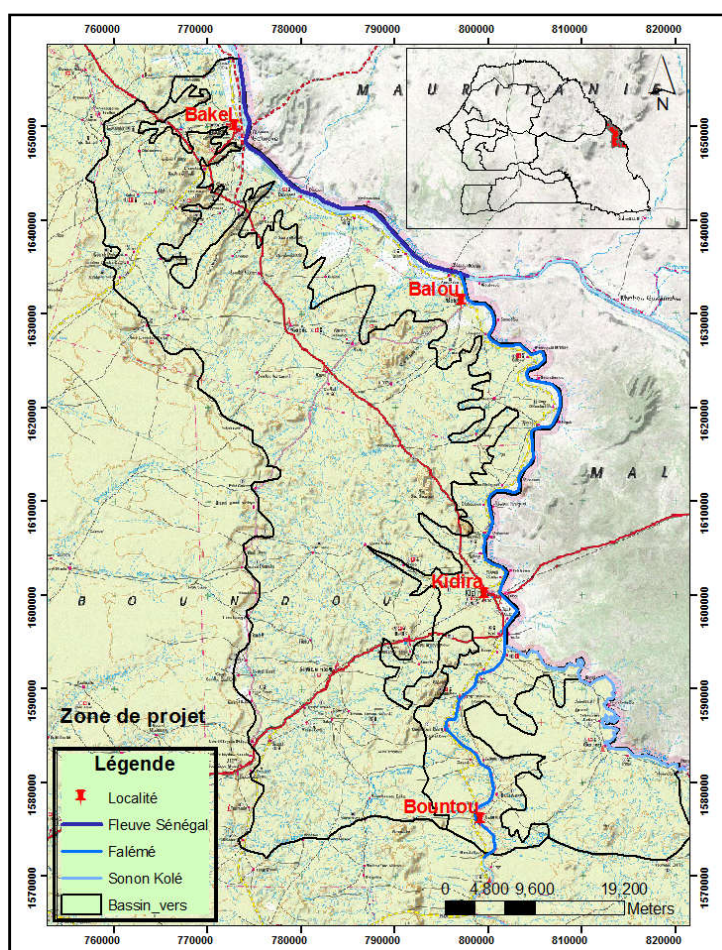


Figure 1: Localisation de la zone du projet

2.1.2. Géologique et hydrogéologique de la zone d'étude

2.1.2.1 Géologique de la zone

Ces informations sur la géologie découlent spécifiquement de : 1/ la carte géologique au 1/200 000 qui couvre la feuille de Bakel-Semme Sud-Ouest/Notice explicative englobant la zone d'étude ; 2/ la carte hydrogéologique au 1/500 000 du Sénégal Oriental/Notice explicative. Ces deux documents ont fait la synthèse des travaux effectués dans la zone du projet qui fait partie de la zone de socle caractérisée par deux domaines distincts que sont le Birrimien et les Mauritanides. Ces domaines sont constitués :

- d'un ensemble d'unités allochtones appartenant à la chaîne des Mauritanides dans la partie occidentale - Ces unités allochtones, plus ou moins métamorphisées et déplacées vers l'Est chevauchent un avant pays constitués des séries sédimentaires autochtones d'âge néoprotérozoïque à paléozoïque localisées de part et d'autre de la rivière Falémé.
- des terrains du socle birrimien d'âge paléoproterozoïque qui affleurent dans la partie la plus orientale.

L'ensemble de ces unités géologiques est regroupé par des filons de dolérites.

Par ailleurs un empilement tectonique caractéristique de la chaîne des Mauritanides au Sud du Fleuve Sénégal et précisé par la cartographie de la feuille au 1/200 000 de Bakel-Semme Sud-Ouest (Fig. 2) révèle les unités géologiques rattachées au groupe des Mauritanides que sont :

1. le groupe de Walidiala représenté par des tillites à blocs tachetés qui affleurent en rive droite de la Falémé et au niveau de Amadji. Ces tillites affleurent également au village de Marsa et sont étroitement associés à un ensemble de roches volcano-plutoniques constitué de sills de dacites
2. le groupe du Mali représenté dans la zone du projet par des argilites beiges tuffacées de part et d'autre de la Falémé
3. le groupe de Termesse caractérisé dans la zone d'étude par des affleurements de basaltes tholeiitiques à l'Ouest de Marsa
4. le groupe de Gueneiba (ou unité de Gabou et de Gounia dans la zone de projet) est représenté par des métavolcanites basiques et de chloritoschistes.

Du point de vue affleurement, de Bountou à Nahé le long de la Falémé, le groupe du Mali constitué de terrains sédimentaires à volcano-sédimentaires recouvre directement les formations du Walidiala. Ce sont d'épaisses successions de pélites, de siltites et de grauwackes avec des horizons de silicites et cinérites. Vers le Nord à Aourou et Amadji, ces formations recouvrent les calcaires dolomitiques. A l'Ouest de Kidira, les formations du groupe de Boundou composées de grès arkosiques alternant avec des niveaux argileux chevauchent sur le groupe du Mali. Dans cette zone, ce groupe est reconnaissable avec des collines allongées N-S.

De Aroundou à Bakel, les groupes de Gabou, Bakel et de Marsa caractérisent les formations sub-affleurantes constituées de métavolcanites basiques, jaspes, schistes variés, argilites et grès quartzites. L'occurrence des alluvions se limite au niveau des cours d'eau de la Falémé et du Fleuve Sénégal. Ils sont bien représentés en affleurement où ils sont entaillés par des figurés d'érosion. Sur les berges de la Falémé, ils constituent une falaise encaissante relativement abrupte d'une épaisseur moyenne de 3 à 5 m d'environ. Toutefois, leur extension est relativement peu étendue dans la zone amont de la Falémé et le faciès est plus silto-argileux. Par contre, de Kidira vers Bakel, ces formations sont plus sableux conglomératiques et leur extension est plus marquée. Dans cette zone, elles constituent des niveaux perméables et productifs.

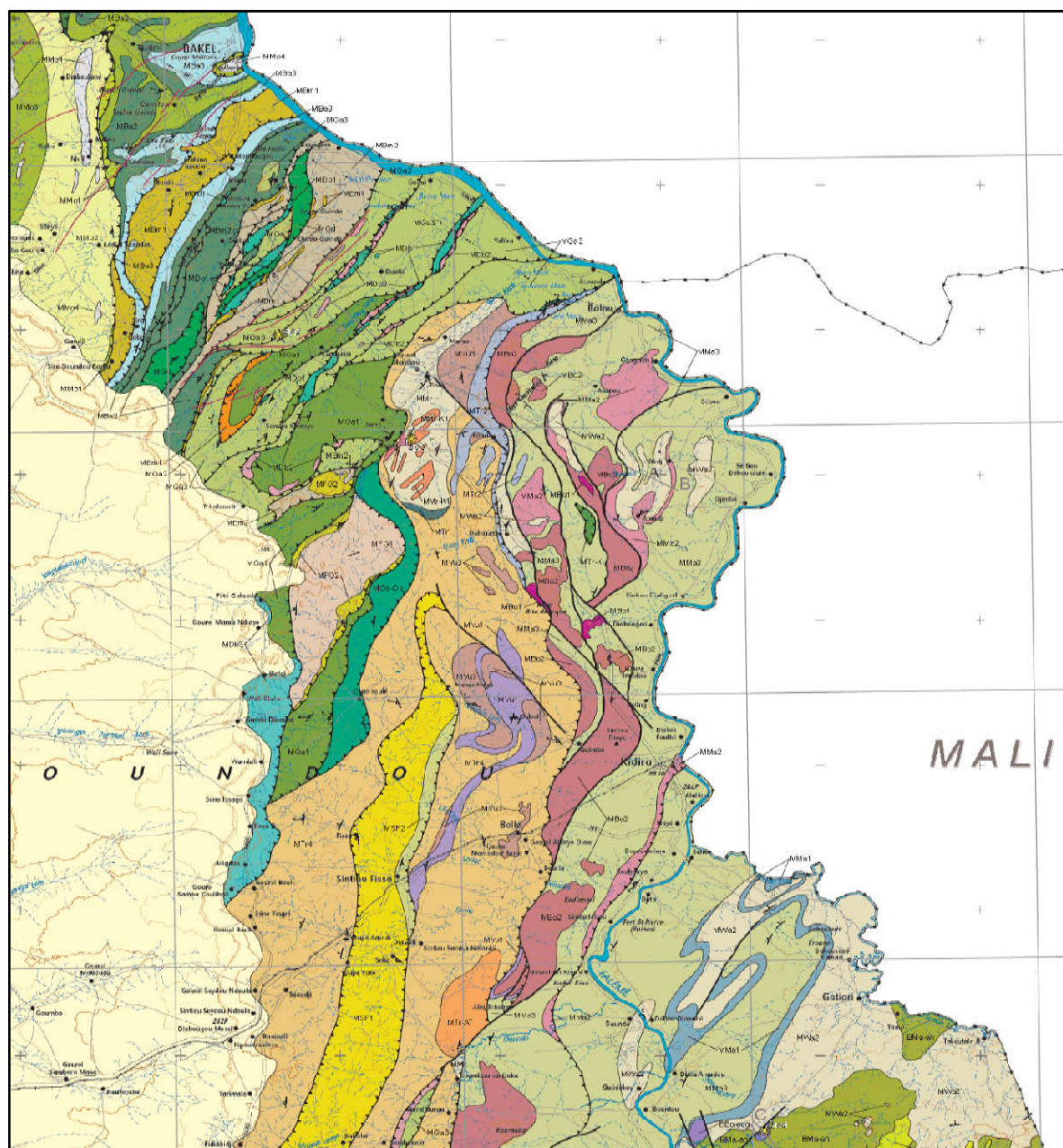


Figure 2: Contexte géologique (extrait de la carte feuille Bakel-Semme Sud-Ouest / PASMI)

2.1.2.2 Hydrogéologie de la zone d'étude

L'hydrogéologie de la zone d'étude met en évidence un système bicouche : des altérites jouant le rôle d'un horizon capacitif (susceptible d'accueillir des quantités d'eau importantes) mais peu transmissif (c'est à dire peu à même de fournir des débits intéressants) reposent sur un horizon fissuré constituant un horizon transmissif mais le plus souvent peu capacitif. Ce modèle est nuancé par la nature lithologique des altérites. La gamme lithologique s'étend d'entités à dominante sableuse (arène granitique) à des altérites à dominante argileuse pour des roches magmatiques basiques à ultra-basiques.

Ce modèle coïncide avec les observations faites sur le terrain qui montrent que la très grande majorité des puits creusés s'arrêtent à la base de la zone altérée, la roche fissurée investiguée par la méthode géophysique présente un potentiel non négligeable capté par les forages.

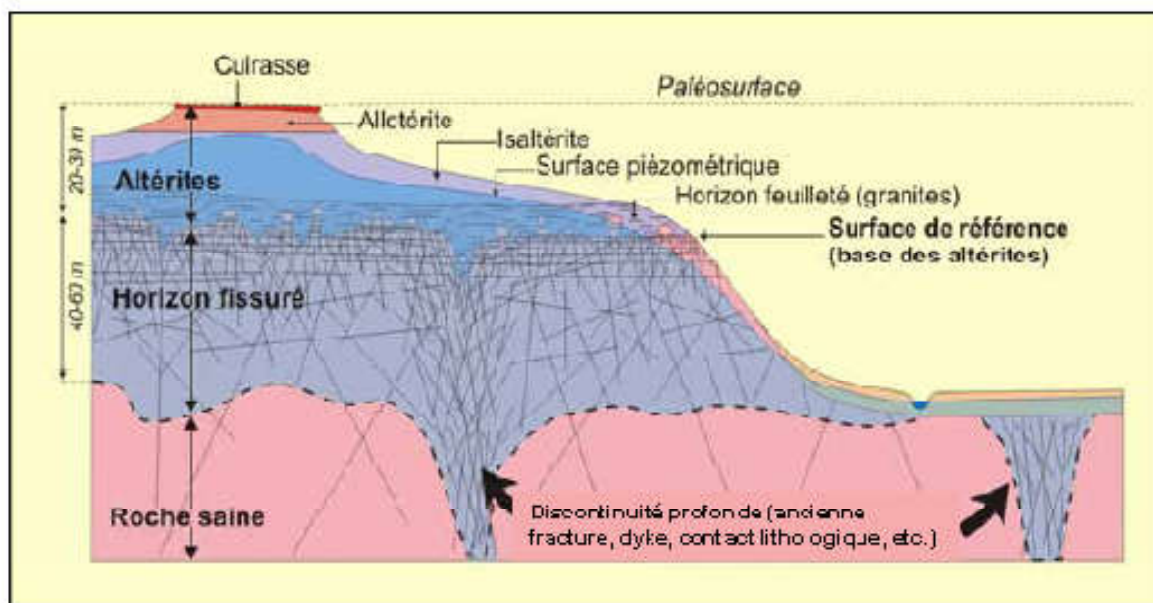


Figure 3: Schéma conceptuel de configuration d'aquifères de socle

2.2. Acquis des investigations hydrogéologiques de la nappe des sables alluvionnaires entre Bakel et Kidira

Les investigations hydrogéologiques visent plus particulièrement à définir la configuration géométrique et le fonctionnement du système nappe/eau de surface de la zone de Bountou à Bakel. Elles sont relatives à la collecte des données existantes (issues de la phase 1), à l'acquisition des données thématiques complémentaires qui ont mobilisé sur le terrain les experts hydrogéologue, géophysicien, topographe et hydrologues du groupement Idev-Artelia en compagnie des homologues de la DGPRE ainsi que des stagiaires (Idev et DGPRE) et de doctorants. Cette étape a été suivie d'un traitement, d'une analyse et d'une interprétation des données pour définir le mode de fonctionnement hydrodynamique et hydrochimique du système et pour établir le modèle conceptuel. Les méthodes d'acquisition et de traitement des données de même que la conception des réseaux de mesures ont été largement documentées dans les rapports 2 et 3 soumis au client. Toutefois en guise de rappel, nous présentons succinctement les méthodes utilisées.

Ainsi dans ce qui suit, nous présentons les principaux acquis issus de ces investigations.

2.2.1. Résultats cartographiques

Les investigations cartographiques ont été conçues à partir de deux sources :

- de cartes thématiques élaborées dans le cadre du programme PNAT (1986) pour l'hydrogéologie, la morphopédologie.
- d'images Landsat 2013 et 2014 interprétés pour l'occupation des sols.

Ces données ont été vectorisées et intégrées dans Arc GIS.

Les travaux ont permis de réaliser les cartes morphopédologique et d'occupation du sol (figures 4, 5) qui ont servi de base pour justifier la recharge directe et indirecte du modèle conçu.

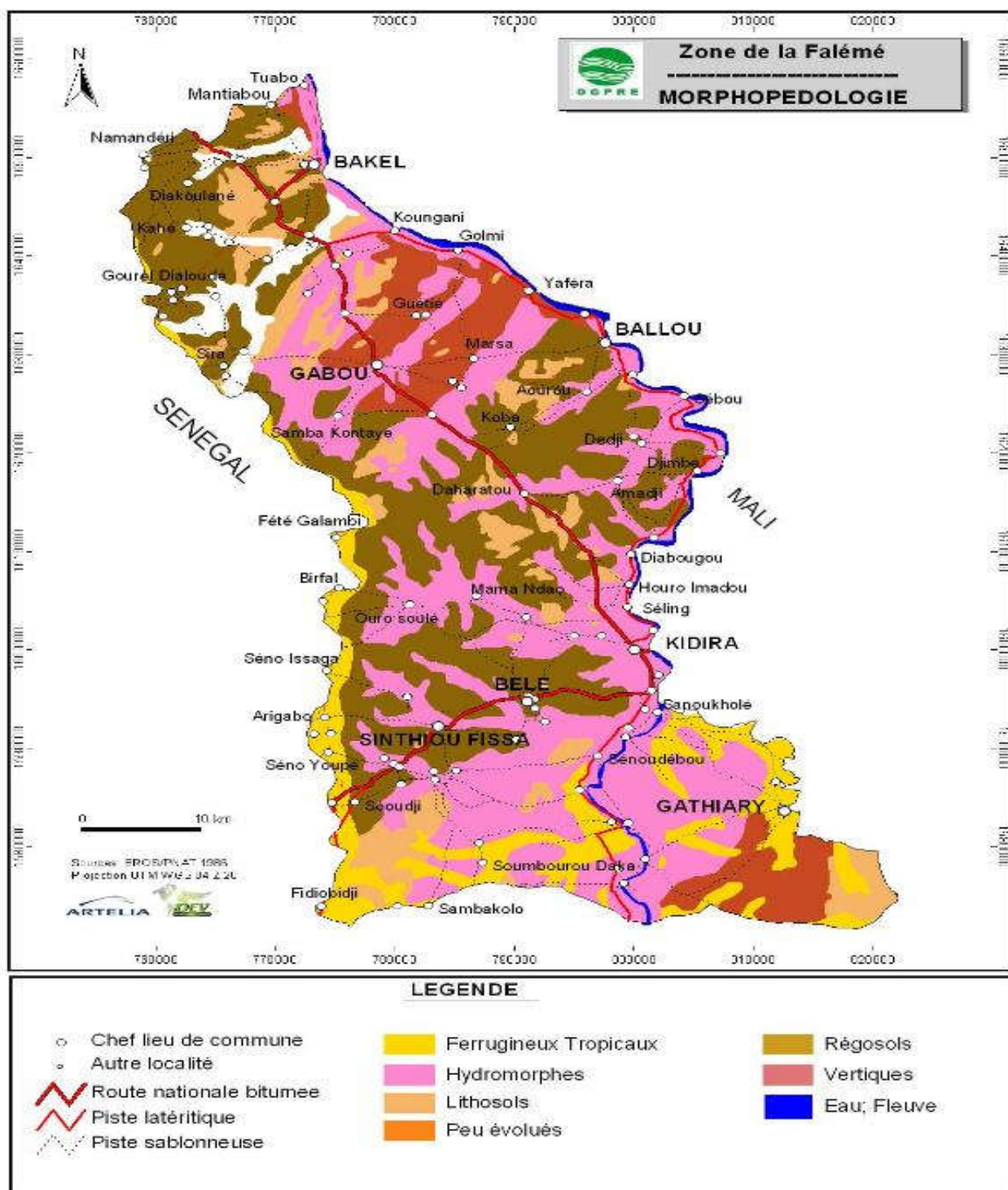


Figure 44: Carte morphopédologique de la zone du projet

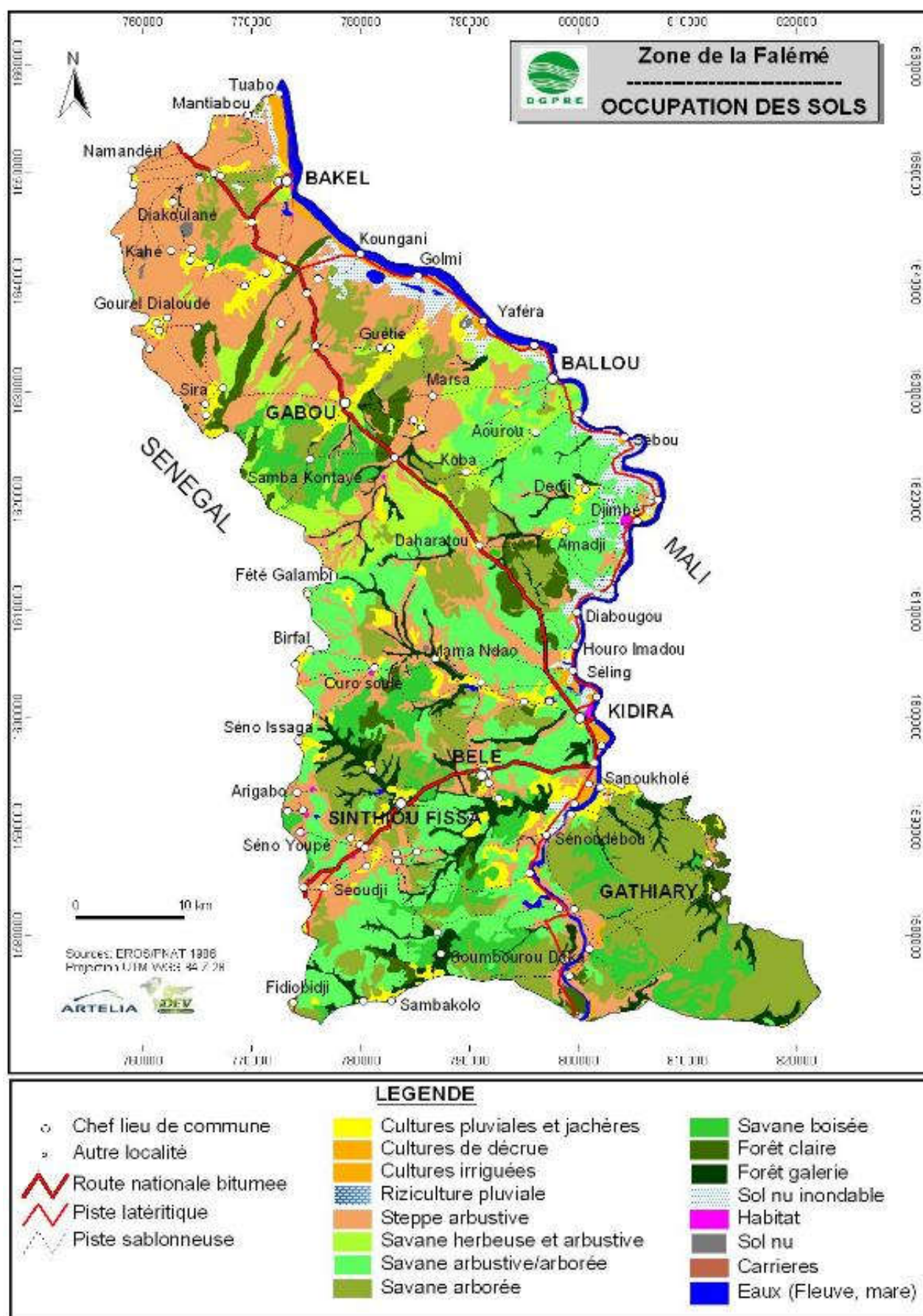


Figure 5 : Carte d'occupation des sols

2.2.2. RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS DES DONNÉES HYDROGÉOLOGIQUES

Les résultats et interprétations concernant l'Hydrogéologie ont permis de définir :

- La configuration géométrique du réservoir
- La configuration de l'écoulement- relation nappe/eau de surface
- Les caractéristiques hydrodynamiques
- Les caractéristiques hydrochimiques

2.2.2.1 Configuration géométrique

La configuration géométrique du réservoir a été essentiellement déduite des résultats de prospection géo électrique. Ces données ont permis de délimiter les horizons productifs de l'aquifère constitué de sables alluviaux et de l'aquifère fracturé jusqu'à la roche saine. Pour chaque SE, les coordonnées géographiques, l'altitude du point, le toit et mur de l'horizon des alluvions, et des toits, mur et épaisseur de l'horizon ont été définies en rapport avec les valeurs de résistivités exprimées en ohm.m.

Horizon des alluvions

Cet horizon est très faiblement représenté dans la zone (Fig. 6); son extension et sa puissance sont relativement faibles (5m en moyenne) à l'exception de Bakel où elle est de 12m avec une résistivité plus grande (190 – 363 ohm.m) marquant la présence d'un aquifère productif. Dans cette dernière zone, les forages de la SDE fournissent un débit intéressant. Par contre, la faible résistivité de 35 à 50 ohm.m au niveau des localités de Golmi, Khounghani, Alahina correspondent à des alluvions très argileux de faibles perméabilités sont peu productifs. Cette observation a été faite lors de la mission de reconnaissance et également à l'examen des logs de forages où les niveaux captés se situent pour la majorité dans les horizons fracturés.

De plus, il a été noté que cet horizon est le plus souvent dénoyé, le niveau statique se trouve dans la roche fracturée. Ces données et observations faites ont permis de réorienter les investigations en y intégrant l'aquifère fracturé.

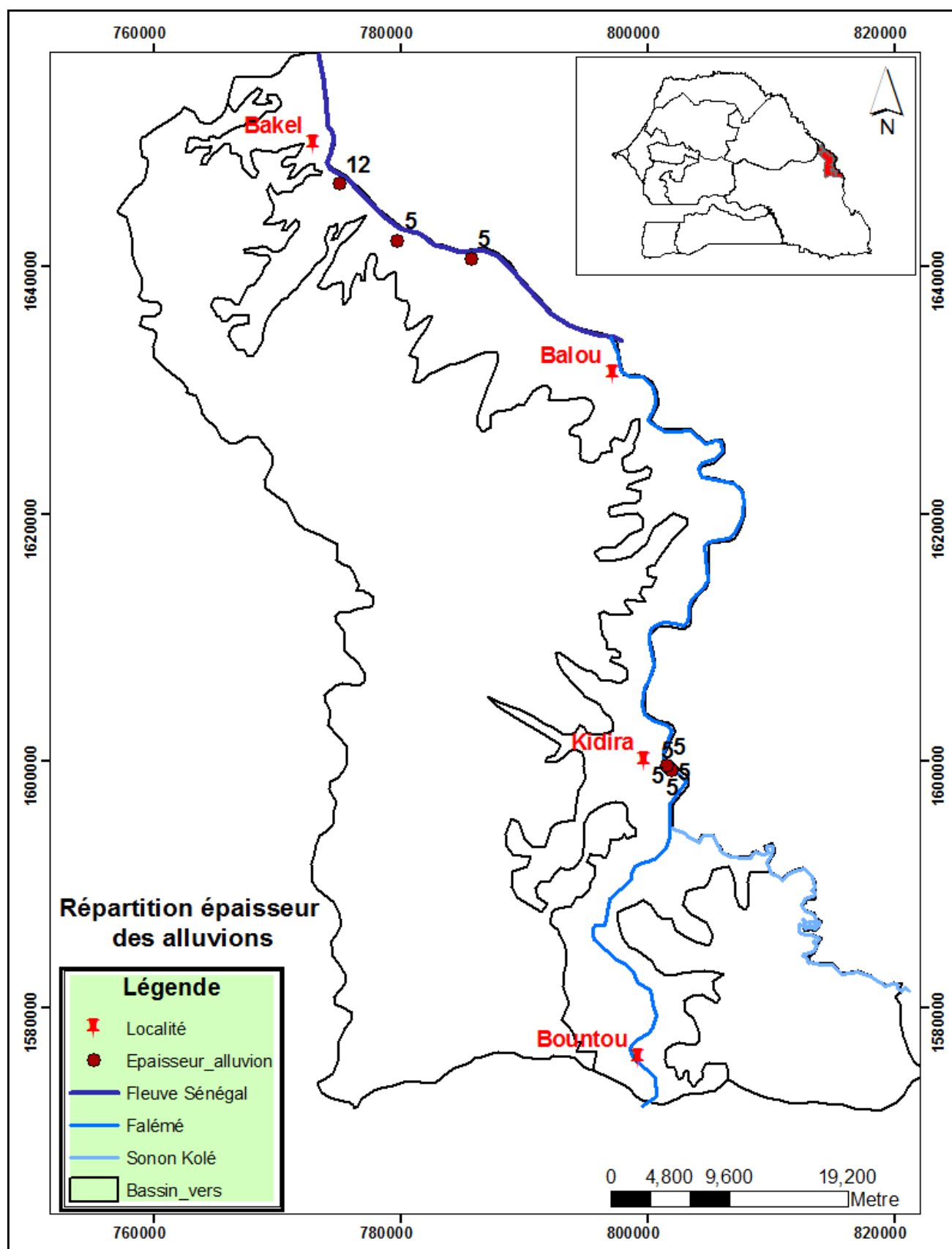


Figure 6: Carte des épaisseurs des alluvions

Horizon fracturé

L'horizon fracturé regroupe à la fois les schistes et roches basiques fracturées. Cet horizon caractérisé par des valeurs de résistivité faibles présente un toit de profondeur variable allant de 7m à 25m max et un mur variant de 18 à 112m (Fig. 7). Les valeurs élevées de résistivité (200 à plus de 500 ohm.m) traduisent une fracturation profonde mais cette dernière est très localisée dans la zone du projet. Sur certains SE comme Aourou, Dialla Amadou, à la latitude de Fort St Pierre, il existe un deuxième niveau de puissance allant de 20 à 40m. La puissance de cet horizon fracturé est également variable 7 à 97m (Alahina à Kidira) avec en moyenne 36m. Dans la zone localisée entre Falémé et Alahina, deux sondages électriques ont montré une forte fracturation (SE56 et SE57) sur des puissances de 95 et 85m. Cette zone pourrait renfermer de bonne perméabilité et des potentialités hydrauliques appréciables. Elle est d'ailleurs sollicitée par l'implantation et la mise en service de 2 forages débitant entre 20 et 30 m³/h destinés à la ville de Kidira.

Il faut toutefois souligner que la nature et le type de fracturation ne permettent d'affirmer une connexion entre les différentes zones et par conséquent, une communication hydraulique. La circulation hydraulique en zone de socle est assurée par l'inter connectivité des fractures ou la continuité de celles-ci suivant des dimensions grandes. Il s'agit d'une porosité secondaire liée à la tectonique de la région.

A ce stade des investigations, nous ne pouvons garantir que l'horizon fracturé constitue une unité homogène dans toute la zone du projet. Le seul argument qui pourrait être retenu et justifié la connexion hydraulique entre fractures c'est l'allure de la piézométrie qui ne montre aucun seuil hydraulique traduisant une rupture de pente et par conséquent une non continuité des fractures.

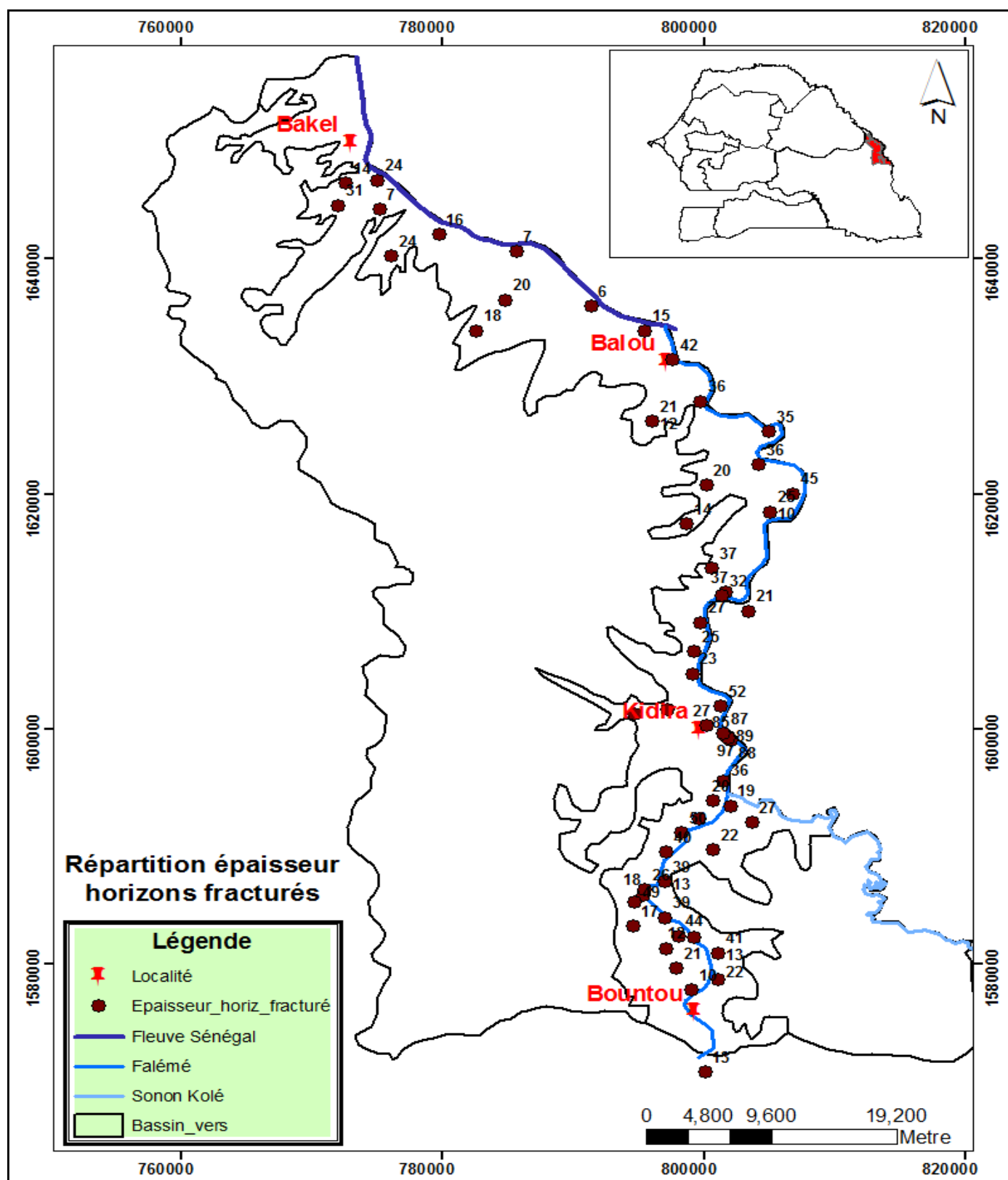


Figure 7 :: Carte des épaisseurs de l'horizon fracturé

Toutefois, faute de preuves, nous avons considéré l'horizon fracturé continu où 6 coupes géo électriques ont été dressées. Il s'agit de 4 coupes longitudinales longeant les cours d'eau du fleuve Sénégal et de la Falémé et de deux transversales.

Dans la zone de Bakel à Ballou, deux coupes (Fig.8, 9, 10) ont été dressées : une coupe longeant la rive gauche du fleuve Sénégal et une coupe transversale au niveau sur le transect Golmi- Guétié. Ces coupes montrent des variations importantes de l'horizon fracturé avec les plus fortes épaisseurs à Bakel et Ballou. Entre Kounghani et Aroundou, les épaisseurs sont relativement faibles pour produire des débits importants. On note également que les alluvions sont discontinues et ne se manifestent qu'au niveau de Bakel, Kounghani et Golmi. Ces deux horizons sont recouverts de sables argileux - argiles sableuses au sommet de Golmi vers l'extérieur du Bassin.

Dans la zone de Ballou à Kidira, l'horizon fracturé est relativement homogène en puissance environ 35m entre Ballou et Sébou ; il repose directement sous le recouvrement sablo-argileux. La puissance diminue de moitié vers l'amont du bassin entre Guétié et Amadji. De Sinthiou Déboukhoulé à Kidira le long de la Falémé, les alluvions sont peu ou pas représentés, par contre on observe une épaisseur variable de 25m à plus de 90m à Kidira. De Kidira vers l'ouest (amont du bassin), l'épaisseur de l'horizon fracturé augmente pour atteindre 50m.

De Kidira à Alahina, la puissance de l'horizon dépasse 100m sous un faible recouvrement discontinu d'alluvions et de sables argileux. Par contre, elle est très variables de Nayé vers Bountou. La puissance de l'horizon fracturé est très variable ; faibles à Sanoukholé, Djita, Gounia et Ouro Mboldi, il représente un horizon productif de Sanoukholé à Djita et de Fort St Pierre à Faboli (Fig. 21, 22 et 23).

En définitive les coupes géoélectriques montrent une configuration géométrique très variable qui dépend surtout de l'intensité de la fracturation suivant les zones. Mais en tenant compte des niveaux statiques mesurés sur le terrain et qui varient de 5 à 20m et surtout de la morphologie de la piézométrie (cf chapitre 4.3.) une connectivité hydraulique de la fracturation est vraisemblable dans la zone du projet.

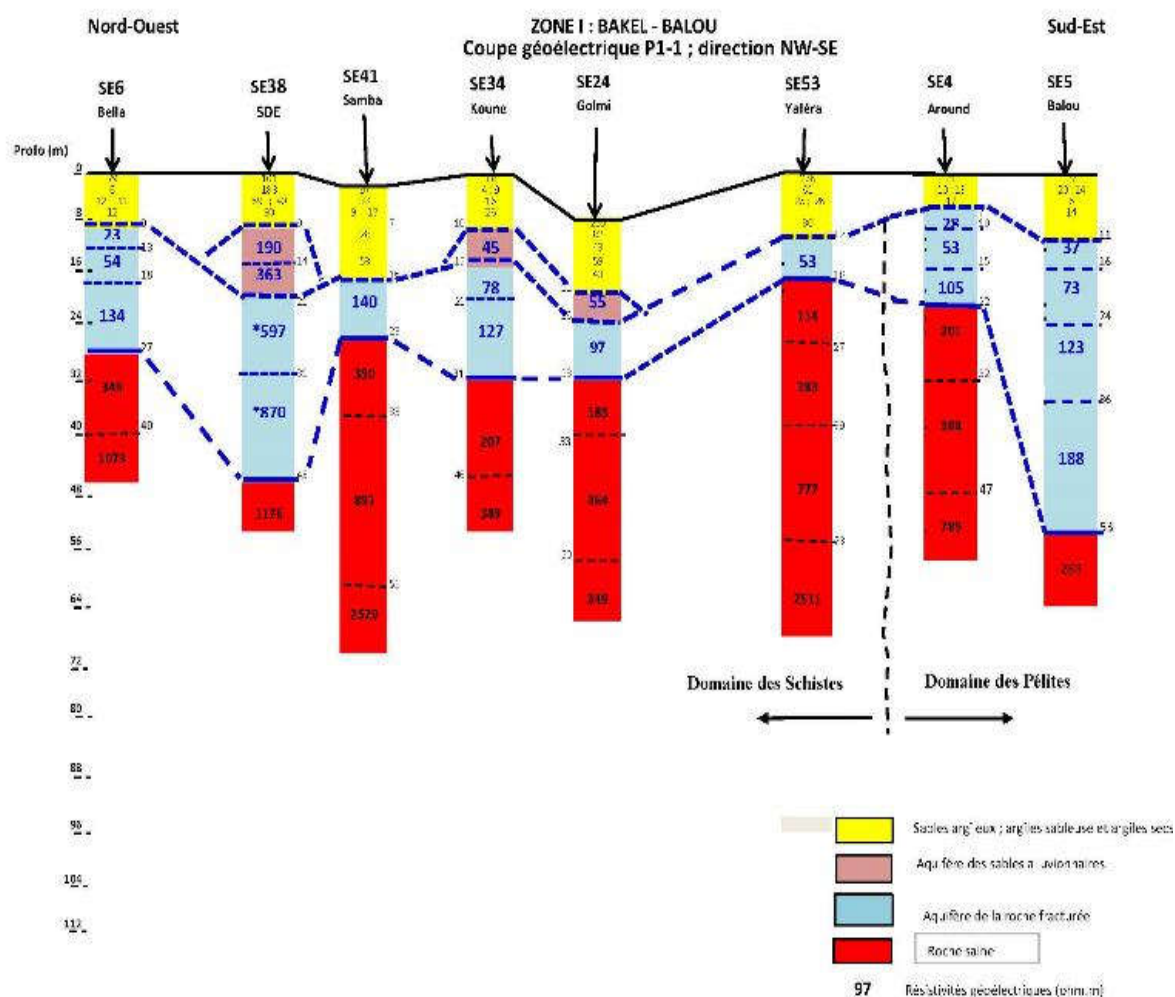


Figure 6 : Coupe géo électrique longitudinale dans la zone de Bakel à Balou

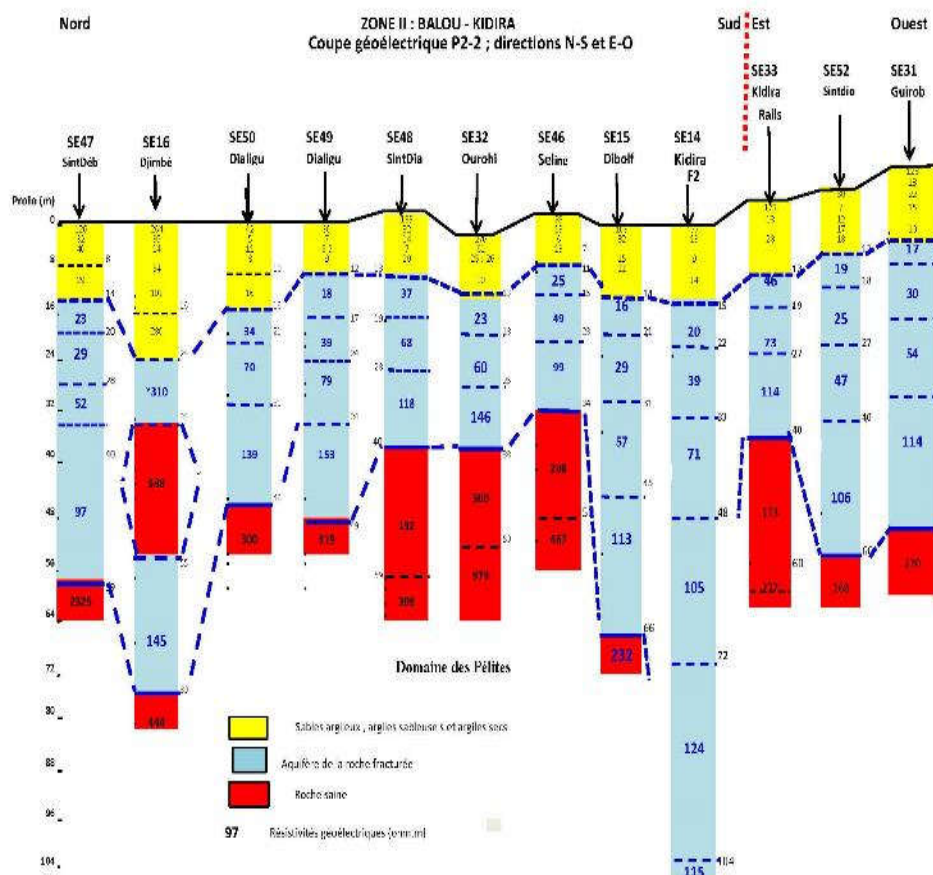


Figure 7 : Coupe géo électrique 2 Ballou - Kidira

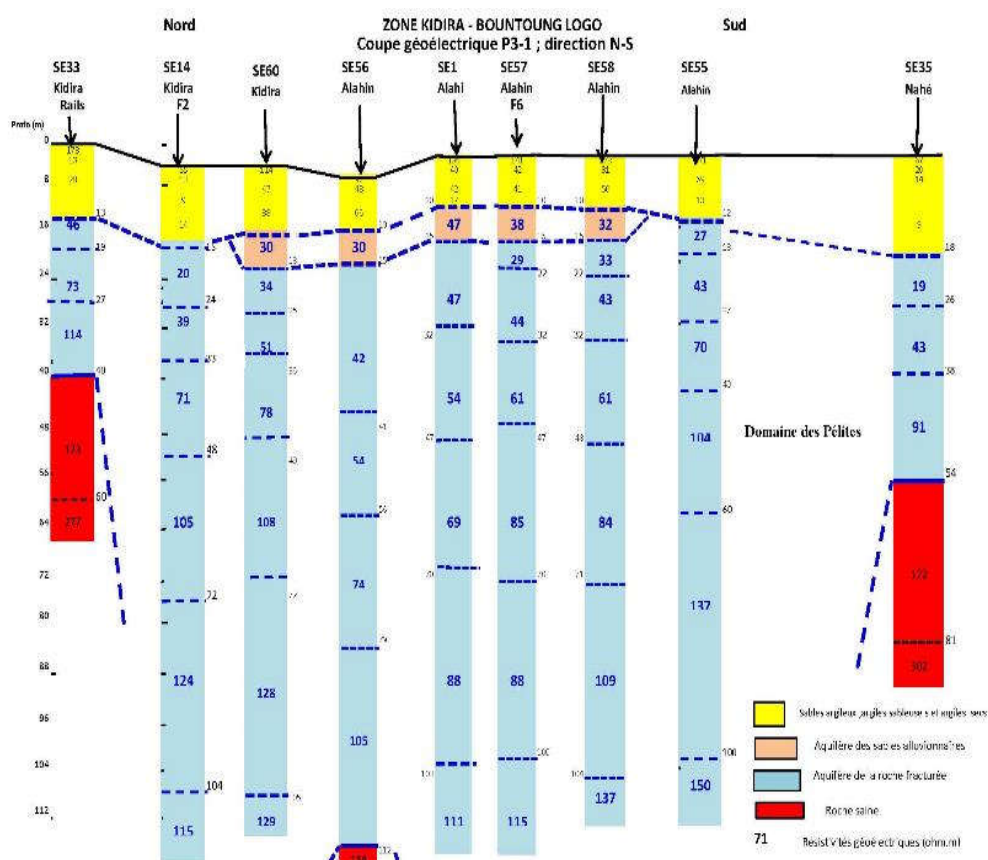


Figure 8 : Coupe géo électrique 1 Kidira - Alehina

2.2.2.2 Configuration de l'écoulement- relation nappe/eau de surface

Les données de bases qui ont permis de définir la configuration de l'écoulement-relation nappe/eau de surface sont celles provenant des mesures réalisées au cours des deux campagnes réalisées en (Septembre et Décembre 2014). La distribution des valeurs obtenues lors de la campagne 2 est plus représentative que celle de campagne 1 pour traduire l'écoulement de la nappe ; toutefois, celles de la campagne 1 ont surtout servi pour évaluer les variations entre les deux missions. Ces données ont été corrigées en niveaux piézométriques à partir des données de nivellement.

Distribution des valeurs de niveau statique

Les données recueillies lors de la campagne 1 de Septembre 2014 au niveau des 31 ouvrages (dont 5 forages et 26 puits) ont permis les mesures de niveau statique. Ces dernières montrent des profondeurs de nappe variant entre 4.9m (Dedji) et 20.25m à Naya avec la plupart des valeurs comprises entre 7 et 12m. Les faibles profondeurs se retrouvent dans la zone de Amadji et Dedji. Pour les forages ne disposant pas de dispositif de mesure, les valeurs à la réception des ouvrages sont entre 4.45 et 16.76m.

Celles de la campagne 2 de Décembre 2014 montrent également les mêmes tendances avec des niveaux statiques variant de 6.02 à 19.1m (Fig. 11) et les faibles profondeurs se retrouvant dans la zone de Dedji et Amadji.

La comparaison des valeurs de NS entre les deux campagnes montre une variation relativement faible pouvant découler soit de la recharge par infiltration des eaux de pluie soit par l'effet de l'exploitation au moment de la mesure. Sur certains puits, la baisse peut atteindre 2 à 3.5 m comparée aux autres ouvrages où elle se situe entre 0 et 1.5m. On note toutefois, une remontée de la nappe au niveau du forage de Sénédebou (+ 1.75m) et au puits de Nahé (+ 10.6m).

Au total, la nappe contenue dans les formations alluviales et fracturées est peu profonde surtout dans sa partie Nord entre Kidira à Bakel où elle est à moins de 10m. Les variations de NS sont également faibles mais celles-ci doivent être prises avec précaution puisque la majorité des mesures ont été effectuées sur des puits en exploitation et par conséquent ne reflètent pas l'état de la nappe au repos.

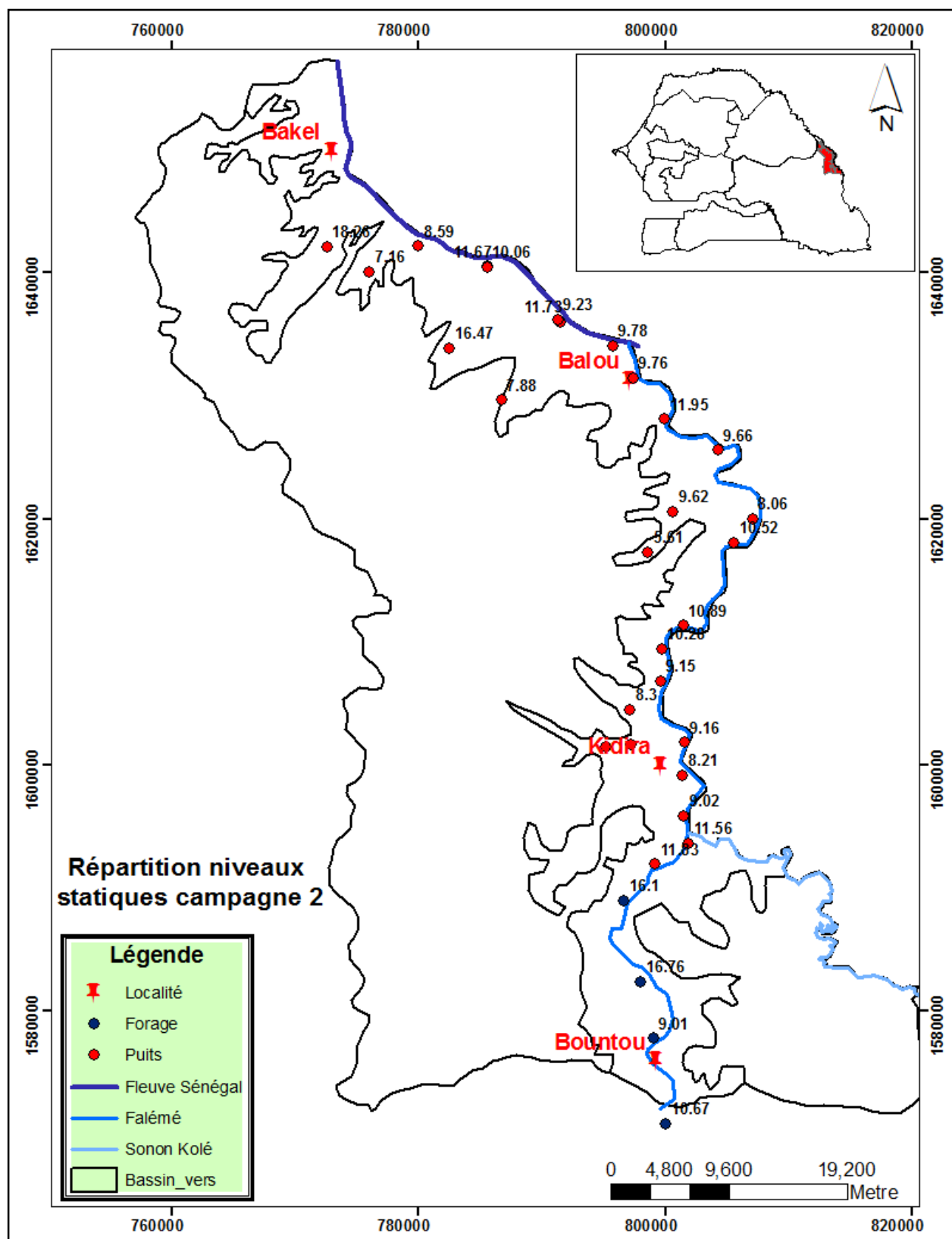


Figure 11: Carte de distribution des valeurs de NS de la campagne 2

Distribution des valeurs de niveau piézométrique

Les valeurs de NP ont été calculées sur les ouvrages nivelés, lors de la campagne 2 et qui sont au total de 28 (Fig. 12) du fait ces données sont plus complètes et représentatives de l'écoulement du système dans la zone du projet que celles de la campagne 1. Les incohérences observées sur les données de la campagne 1 ne permettant pas d'avoir un schéma conceptuel d'écoulement de la

nappe et sa relation hydrodynamique avec les cours d'eau ont été soustraites de l'analyse. Pour cette dernière, des altitudes de plans d'eau de la Falémé et du Fleuve Sénégal ont été également mesurées sur un certain nombre de points lors de la mission de nivellement. Au niveau de la poche de Faboli, les mesures d'altitude du plan d'eau varient de 26.5 en amont à 24.17m (à l'ouest) comparées à celles effectuées à Kidira (au niveau de la station hydrologique) et à Bakel qui sont respectivement de 19.6 et 13.5m.

Comme mentionné dans le sous chapitre précédents, les données de NS et par conséquent celles de NP ne représentent pas l'état réel de la nappe au repos ; celles-ci le plus souvent ont subi l'influence des pompages effectués lors de la prise de mesures et représentent des niveaux dynamiques. Toutefois, elles varient de + 11.64 à +31.94m avec les plus faibles valeurs mesurées au niveau des ouvrages localisés proche des cours d'eau de la Falémé et du fleuve Sénégal et les plus grandes valeurs vers l'amont du Bassin versant. Ceci traduit un écoulement global de la nappe, de l'amont du bassin vers les cours d'eau qui lui sert comme exutoire. Ce type d'écoulement est plus marqué dans la zone de Bakel au sud de Ballou où les cotes piézométriques diminuent de +30 à +12m. Vers le Sud de ce secteur (Ballou à Sènedebou), le gradient hydraulique est plus faible avec des cotes piézométriques de + 24 à +19m. Par contre la zone amont de Bountou à Sènedebou, les quelques données collectées semblent être effectuées par l'influence du pompage et les cotes piézométriques sont inférieures à celles du plan d'eau de la Falémé traduisant ainsi une alimentation latérale de la nappe par le cours d'eau. Ce schéma d'écoulement devrait être pris par précaution si l'on tient compte de l'influence du pompage lors de la mesure. Toutefois au vu de cette configuration, la zone de la Poche de Faboli semble ne pas subir l'arrivée par écoulement latéral des eaux de la nappe et ceci très certainement contribuerait à l'assèchement des parties amont et aval de la poche après la période de crue.

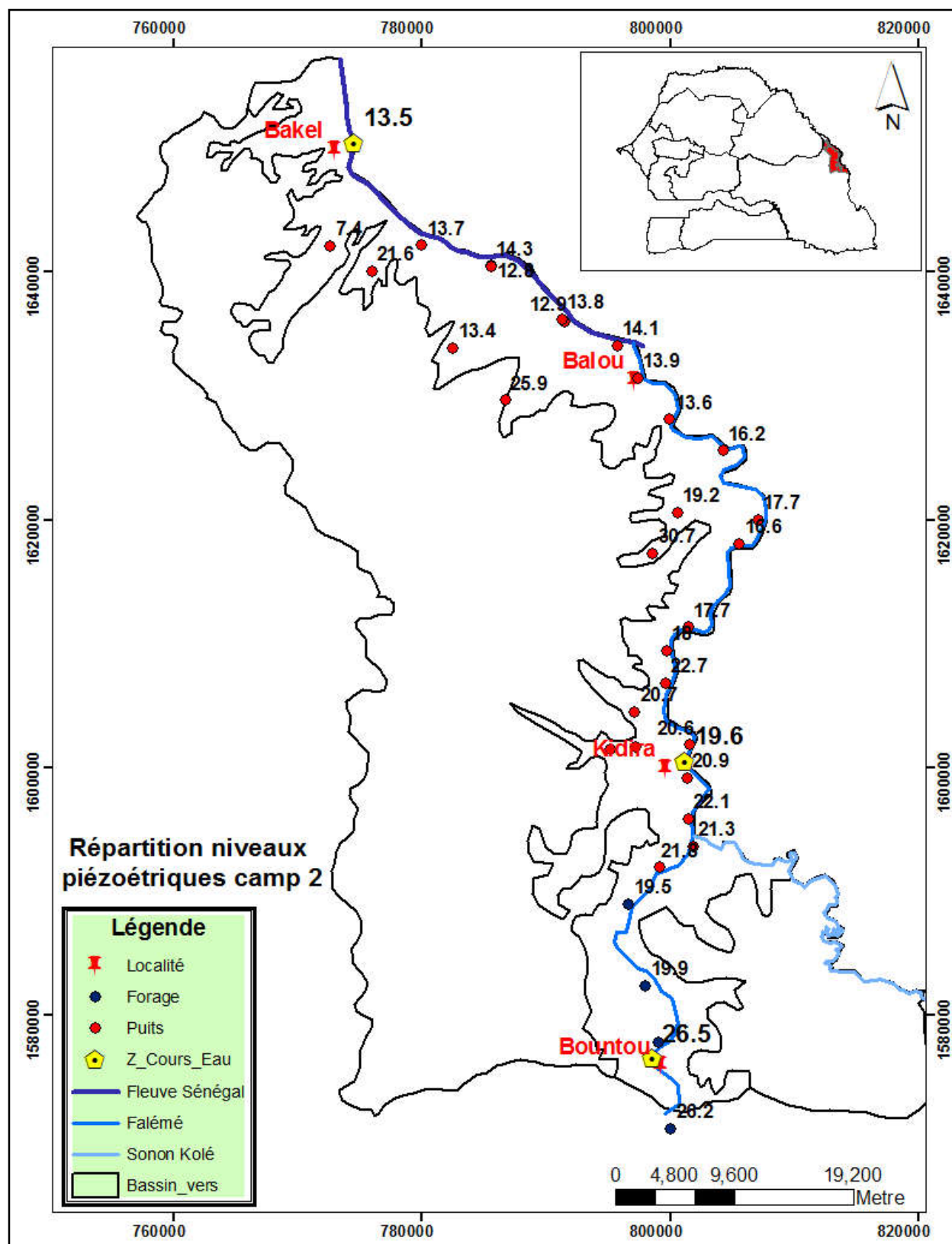


Figure 12: Carte de distribution des valeurs de NP de la campagne 2

Tableau 1: Comparaison des valeurs de NS et NP des 2 campagnes

Nom de la Localité	Type Ouvrage	X2	Y2	Z	margelle	NS1/sol	NS2/sol	NP1	NP2
Darou Salam	Puits	800830	1593871	31.183	0.5	8.67	9.1	22.013	21.583
Sanoukholé	Puits	801895	1593619	32.896	0.9	11.04	11.56	20.956	20.436
Djita	Puits	799140	1591915	33.677	0.77	10.61	11.83	22.297	21.077
Sénédebou	Forage	796687	1588962	35.614	0.5	17.85	16.1	17.264	19.014
Nayé	Puits	801479	1595853	31.094	0.6	19.65	9.02	10.844	21.474
Alayna	Puits	801409	1599121	29.133	0.7	8.16	8.21	20.273	20.223
Ballou	Puits	797395	1631424	23.613	0.7	9.42	9.76	13.493	13.153
Aroundou	Puits	795736	1634046	23.869	0.83	7.31	9.78	15.729	13.259
Gangala	Puits	799965	1628077	25.557	0.65	11.61	11.95	13.297	12.957
Sébou	Puits	804284	1625577	25.814	0.72	7.43	9.66	17.664	15.434
Amadji	Puits	798607	1617291	36.328	0.80	4.38	5.61	31.148	29.918
Amadji	Forage	798646	1667460		0.70	8.56	10.52		
Dialiguel	Puits	801464	1611294	28.597	0.93	9.32	10.89	18.347	16.777
Sinthiou Dialiguel	Puits	799731	1609432	28.327	0.9	9.64	10.28	17.787	17.147
Ouro Himadou	Puits	799630	1606830	31.847	0.9	8.95	9.15	21.997	21.797
Guirobé	Puits	795208	1601443	34.547	0.56	8.89	12.36	25.097	21.627
Djiboli Foulbé	Puits	801563	1601805	29.766	1.06	8.16	9.16	20.546	19.546
Selling	Puits	797174	1604463	29.01	0.7	8.2	8.3	20.11	20.01
Golmy	Puits	785617	1640500	24.472	0.85	9.47	11.67	14.152	11.952
Yaféra	Puits	791280	1636182	24.594	0.97	8.3	9.23	15.324	14.394
Yaféra	Puits	791506	1636020		0.94	11.74	11.73		

2.2.2.3 Caractéristiques hydrodynamiques

Les données de base ayant servi aux caractérisations hydrodynamiques ont été recueillies à partir des rapports de forages réalisés dans le cadre du programme UEMOA et de la base de données PROGRES. Ces données peu nombreuses sont relatives aux valeurs de débits de réception, débits spécifiques, de transmissivité et de rabattement (tableau 2).

✓ Des caractéristiques hydrauliques Transmissivité, Q, Qs, rabattement

Les valeurs de transmissivité calculées à partir des pompages d'essai réalisés lors de la réception des ouvrages sont peu nombreuses (6) et varient entre 5.10^{-5} et 10^{-3} m²/s. Cette variabilité se justifie bien dans le contexte d'aquifère fracturé où les fractures peuvent être interconnectées ou pas mais également le remplissage des fractures par les sables argileux. Les valeurs élevées de T sont retrouvées au niveau des localités de Ouro Himadou, Sinthiou Dialiguel.

Les débits de réception montrent également des valeurs très variables de 1m³ à 27m³/h (Sinthiou Dioé). Toutefois, la majeure partie des ouvrages présente des débits moyens de 10 à 15m³/h. Les quelques ouvrages qui présentent des débits faibles (1,5m³/h) sont caractérisées par des rabattements très importants (18 à 41m) pouvant aller jusqu'au dénoyage des pompes. Ces ouvrages sont en principe négatifs (Bountou-Gourel Lobbo-Yafera-Debou Diawbé). Par contre, les rabattements dans les autres ouvrages sont relativement faibles, variant entre 1 et 8m avec une moyenne de 3-4m. Ces derniers présentent des débits spécifiques appréciables de l'ordre de 3 à 12 m³/h/m.

Tableau 2: Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère

Nom de la localité	Type d'ouvrage	X	Y	Q réception	Qs	T	Rabattement
Bountou	Forage UEMOA	800073	1570825	1.5	0.08		18.95
Guédékou	Forage 1	798994	1577758	2.769	0.09		

Guédékou	Forage UEMOA	799031	1577764	2.7	0		29.1
Débou Diawbé	Forage UEMOA	799271	1582259				
Doundé	Forage UEMOA	798043	1582373	10.7	3		3.54
Gourel Iobbo	Forage UEMOA	794689	1585231	1.5			41.56
Ari Hara	Forage PM	795394	1585903				
Sénédebou	Forage F1 avec Château d'eau	796687	1588962	8.3	1.89		4.4
Sénédebou	Forage F2	797105	1589517	7.714	0		4.08
Darou Salam	Forage F1 PM	800736	1593868				
Sanoukholé	Forage F3 UEMOA	802015	1593435	14.32	3.23		4.43
Sanoukholé	Forage F2	802144	1593860	2.5	0.423	0.0002	5.9
Nayé	Forage avec Château d'eau	801461	1595566	15	3.75	0.0009	4
Sinthiou Dioé	Forage	797228	1601611	27.7	0		1.92
Guirobé	Forage UEMOA	794694	1601234	13.5	0		7.9
Djiboli Foulbé	Forage UEMOA	801256	1601947	13.5	3.43		3.93
Selling	Forage UEMOA	799092	1604692	13.08	12.33		1.06
Ouro Himadou	Forage avec Château d'eau	799314	1606595	20	2.531	0.0012	7.9
Sinthiou Dialiguel	Forage	799722	1609066	14	2.916	0.001	4.8
Djita	Forage	799607	1592387				
Dialiguel	Forage	801345	1611309	13.5	9.64		1.4
Djimbé	Forage	805741	1618046	12.8	5.76		3.73
Sinthiou Déboukhoulé	Forage	806810	1620008				
Deddi	Forage F2	800174	1620461	13.5	3.2		4.24
Sebou	Forage F1	804008	1625910	12.6	1.9		6.63
Ballou	Forage	797333	1630901	23.4	1.72	0.0009	13.6
Amadji	Forage	798646	1617460	3.5	0.143	1E-05	24.4
Aroundou	Forage	795506	1633864				
Yafera	Forage F2 UEMOA	791363	1635977	1.2	0.03		40.05
Marsa	Forage à panneau solaire	789030	1632698	13			2.24
Khoungani	Forage UEMOA	779723	1642072	11.5	0.5		24.06
Mouribougou	Forage UEMOA	772742	1643178	1.2	0.1		26.08
Dyala Amadou	Forage	800839	1578800				
Dyala Amadou	Forage UEMOA	801256	1578800	12.25	0.61		20.01
Kidira	Forage F1	801054	1599659				
Kidira	Forage F2	801215	1599683				
Golmy	Forage F1	785686	1640567	9	4.7		2.88
Golmy	Forage F4	785557	1640454				
Golmy	Forage F2	785542	1640462				

2.2.2.4 Caractéristiques hydrochimiques

Les données de base ont été acquises lors des campagnes 1 et 2 puis par analyses chimiques au niveau du laboratoire de l'UCAD. Elles sont relatives aux caractéristiques physico-chimiques (pH, CE, T°) mesurées sur site et aux concentrations en éléments majeurs (HCO₃, Cl, NO₃, SO₄, Ca, Mg, K, Na) et éléments mineurs (Si, Fe, PO₄). Le rapport R-02 présente les résultats des caractéristiques physico-chimiques et chimiques des eaux de la nappe et de quelques points d'eau sur la Falémé et du Fleuve Sénégal.

2.2.2.5 Caractéristiques physico-chimiques

Ces données *in situ* concernent les valeurs de pH, T°, TDS, et CE des campagnes 1 et 2 effectuées respectivement en Septembre et Décembre 2014.

Le tableau 3 résume statiquement les valeurs de ces paramètres.

Tableau 3: Statistique descriptive des valeurs de paramètres physico-chimiques

	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type
pH	6	8,47	7,3	0,91
T° (°C)	24,9	34		
CE (µS/cm)	164	4700	916	778
TDS (mg/l)	220	3515	811	602

Les valeurs de T° reflètent la température ambiante au moment de la prise d'échantillons. Les faibles valeurs 24,9°C ont été obtenues pour les échantillons collectés en Décembre au matin, tandis que les valeurs élevées reflètent les échantillons collectés en Septembre. Ces derniers montrent une faible variation de 28 à 34°C.

Les valeurs de pH sont comprises entre 6 et 8 avec une moyenne de 7,3 caractérisant ainsi des eaux neutres à faiblement acides ou basiques.

Les paramètres TDS et CE sont regroupés puisque exprimant la charge minérale des eaux. Ils montrent une très grande variabilité allant de 220 à 3515 mg/l pour le TDS et de 164 à 4700 µS/cm pour la CE avec des valeurs moyennes et écart types de 811 mg/l et 602 mg/l et 916 µS/cm et 778 µS/cm.

Les plus faibles valeurs sont mesurées dans les localités de Boubouya, khounghani, Golmi tandis que les eaux au niveau de Yaféra sont saumâtres. L'origine de cette salinité au niveau de Yaféra n'est pas encore définie mais il est vraisemblable qu'elle provienne d'une ancienne eau salée résultant de la dernière transgression qui a été piégée dans cette zone de Yaféra et les localités de Guedekou, Senedebou et environs. Hormis cette zone, la majeure partie des eaux est douce à moyennement minéralisée. Les figures 27 et 28 montrent la distribution des valeurs de CE pour les campagnes 1 et 2 (Fig 13) où on note une sensible augmentation de la minéralisation dans la zone Sud bordant la Falémé mais également un gradient croissant de minéralisation vers les cours d'eau. Cette observation n'est pas toujours le cas car au niveau de certaines localités situées en amont du bassin versant, les valeurs de CE relativement élevées pourraient provenir de pollution localisée au droit des ouvrages.

La comparaison des valeurs de CE des deux campagnes montrent un adoucissement des eaux collectées en Décembre pour la très grande majorité des ouvrages. Ces valeurs peuvent diminuer jusqu'à 50% (Djimbé) de la valeur de Septembre attestant ainsi une retardation de l'infiltration issue des eaux de pluie. Toutefois, on note une incohérence avec les variations de NS qui devraient montrer une remontée de nappe mais comme les mesures traduisent des niveaux dynamiques suite aux pompages effectués lors de la visite des ouvrages. Par contre, au niveau de quelques puits villageois on observe une augmentation des valeurs de CE ; celle-ci serait le fait de pollution au droit des ouvrages.

Les caractéristiques physico-chimiques mesurées sur le long de la Falémé jusqu'à la confluence avec le fleuve Sénégal montrent des eaux très faiblement minéralisées avec des valeurs de CE comprises entre 46 et 50 µS/cm et des valeurs de pH de 7,5 à 7,7.

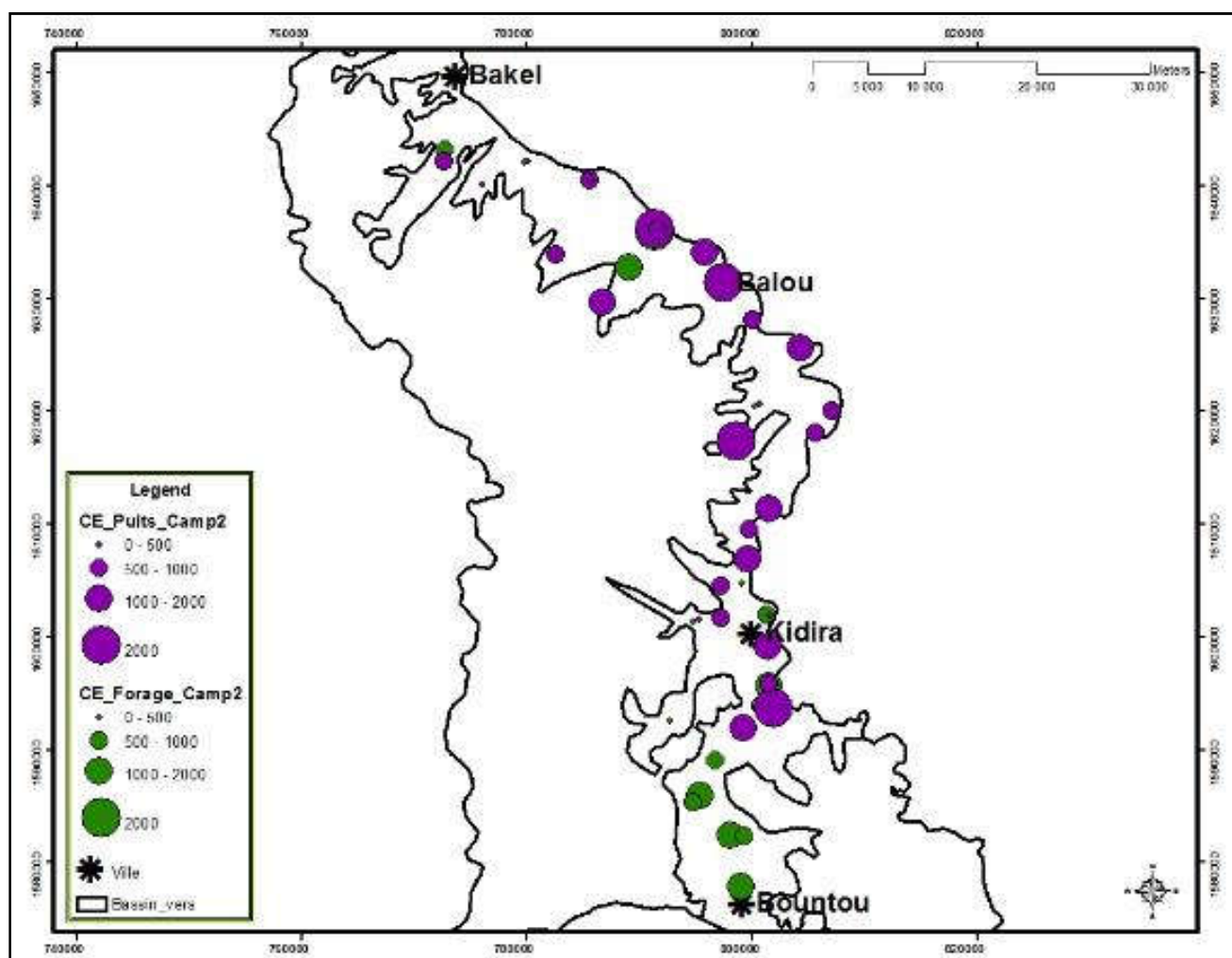


Figure 9: Carte de distribution des valeurs mesurées de CE de la campagne 2

Chimie et typologie des eaux de la nappe

Les résultats des analyses chimiques effectuées lors des 2 campagnes (Rapport R-02) ont fait l'objet d'un traitement statique descriptif où les valeurs minimales, maximales, moyennes et écart types sont présentées dans le tableau 4 qui suit :

Tableau 4: Statistique descriptive des concentrations en ions mesurées

Ions	Minimum mg/l	Maximum mg/l	Moyenne mg/l	Ecart type mg/l
Ca	11,2	430,4	77,9	74,1
Mg	4,8	184,9	31,0	35,2
Na	7,6	350	66	62
K	0,3	8,5	1,9	1,4
Fe	0,06	2,1	0,4	0,4
HCO ₃	67	640	275	121
Cl	5,2	601	76	108
SO ₄	1,6	443	40	68
NO ₃	0	1081	164	222
SiO ₂	21	108	48	17
PO ₄	0,01	0,9		

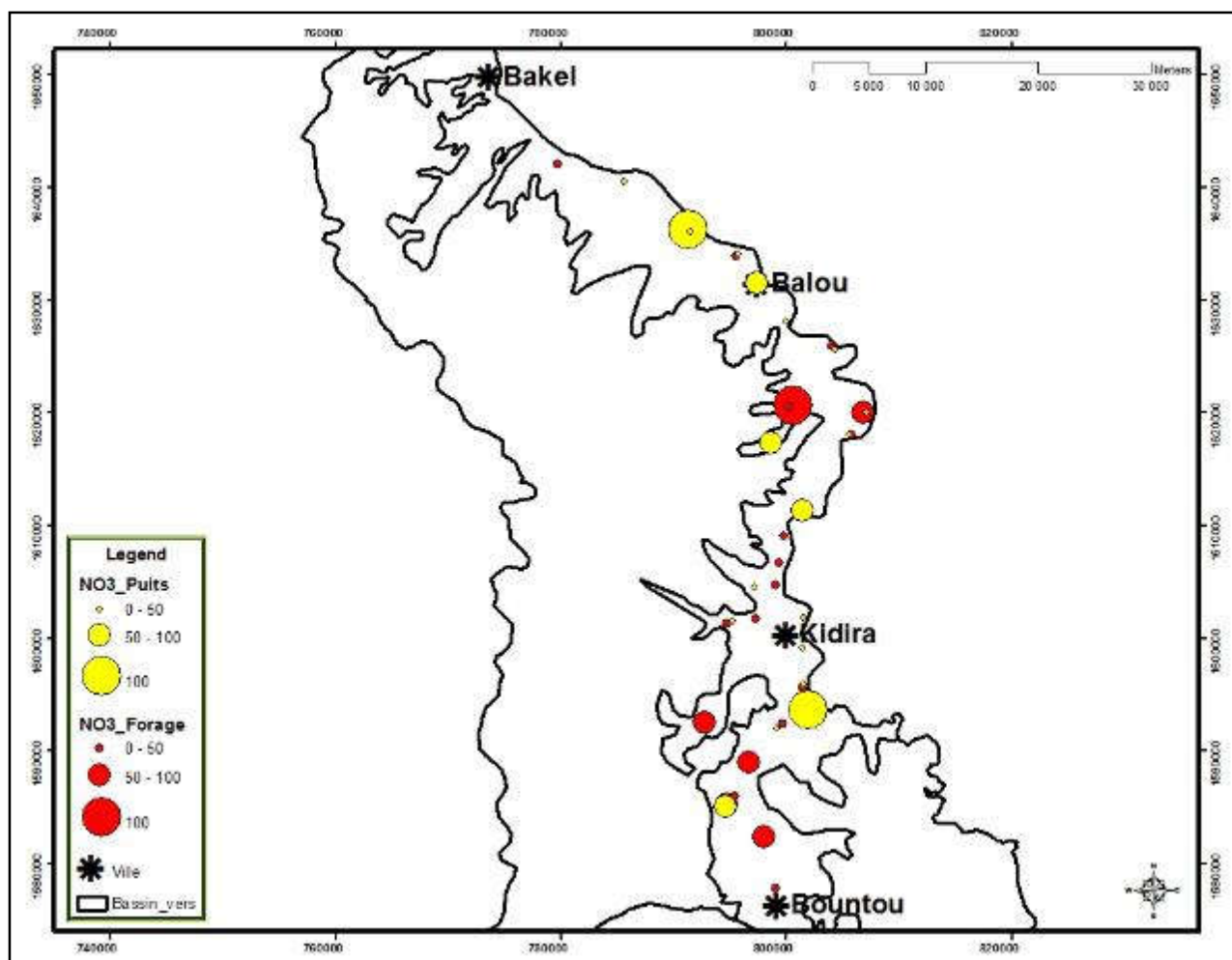
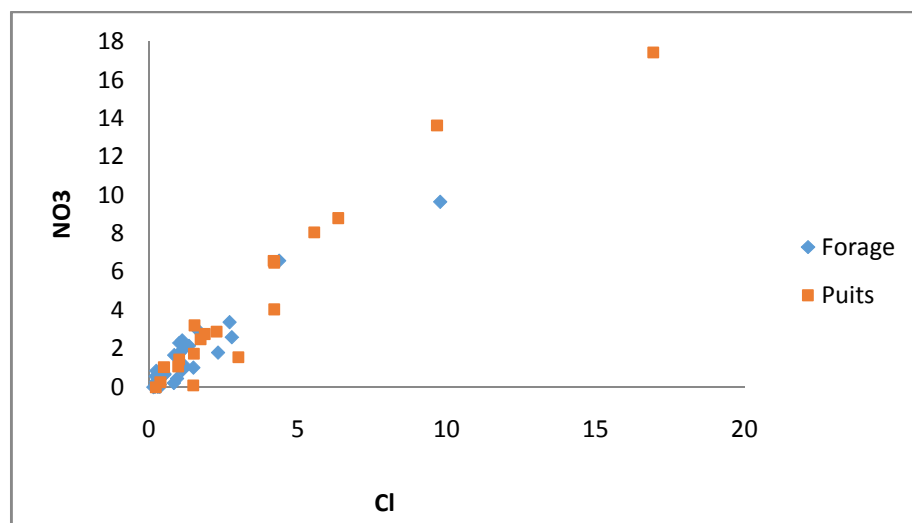
Les données chimiques montrent la prédominance des ions suivant les ordres définis ci bas avec des valeurs d'écart type élevées qui attestent une grande variabilité des concentrations des ions dans la nappe.

pour les cations $\text{Ca} > \text{Na} > \text{Mg} > \text{K}$

pour les anions $\text{HCO}_3 > \text{NO}_3 > \text{Cl} > \text{SO}_4$

Cet ordre d'occurrence des ions et surtout la prédominance des ions HCO₃, Ca, Na se justifie bien dans ce contexte de réservoir de socle où l'hydrolyse des minéraux silicatés représente le processus géochimique majeur responsable de la mise en solution des ions. Ce processus d'hydrolyse libère les ions Ca, Mg, Na, HCO₃ en même temps que SiO₂. D'autres processus peuvent également s'ajouter comme les échanges de base par les argiles où Ca est capturé par la matrice argileuse et Na libéré dans l'eau mais également la dissolution de carbonates qui libère aussi bien Ca, Mg et HCO₃.

Les concentrations de NO₃ sont très variables et relativement élevées jusqu'à plus de 1000 mg/l dans certains points d'eau (Fig.14). Elles présentent une moyenne de 164 mg/l et un écart type de 222 mg/l. Au total 62% des points d'eau échantillonnés présentent des teneurs supérieures à 50 mg/l (norme de potabilité OMS=50 mg/l) avec sur certains points des concentrations de l'ordre de 400 à plus de 1000 mg/l. Ces teneurs élevées sont associées à celles des ions chlorures et la corrélation linéaire positive (Fig. 15) marque l'origine anthropique commune de ces deux(2) ions.

Figure 10: Carte de distribution des concentrations en NO₃ (mg/l)Figure 11: Corrélation NO₃ vs Cl

Ces concentrations élevées en NO₃ et Cl montrent bien l'état de vulnérabilité élevée du système aquifère qui serait la résultante de la faible profondeur de la nappe mais surtout de la porosité de fractures et de schistosité développée dans les formations aquifères où l'advection serait le processus majeur responsable de la rapide propagation de la pollution.

On note également des concentrations relativement élevées en SO_4 sur certains ouvrages ; elles proviendraient certainement de pollution anthropique autour des puits ou aussi de l'utilisation d'engrais chimiques dans les périmètres agricoles.

Les autres ions K, Fe et PO_4 sont en faibles concentrations dans la nappe.

Les données chimiques exprimées en meq/l ont été utilisées par la classification des types d'eau par le diagramme de Piper (Fig. 16 a et b) Ce type de diagramme permet une discrimination des types d'eaux présentes dans les systèmes marqués par la prédominance de certains ions par rapport aux autres. Les résultats montrent les tendances ci-après :

pour la campagne 1 de Septembre les faciès rencontrés sont : Ca-HCO_3 , Ca-Mg/HCO_3 , Ca/Na-HCO_3 , $\text{Ca-Na-HCO}_3/\text{Cl}$, Na-Cl et Na-HCO_3

Les deux derniers faciès sont faiblement représentés comparés aux faciès bicarbonates et bicarbonates chlorurés.

Pour la campagne 2 de Décembre, seuls deux (2) types d'eau sont présents Ca-Mg/HCO_3 et Ca-Mg/Cl .

Ces observations confirment l'hypothèse émise avec les valeurs de CE où l'arrivée des eaux de recharge en Décembre qui a tendance à homogénéiser les faciès ; la dispersion des points dans le diagramme 1 serait le résultat des processus géochimiques ci haut décrits.

Du point de vue aptitude des eaux à l'irrigation, le diagramme de Riverside (Fig. 17) montre que la majorité des points d'eau montre des eaux sont aptes à l'exception de celles qui sont saumâtres et qui sont localisées dans la zone de Yaféra.

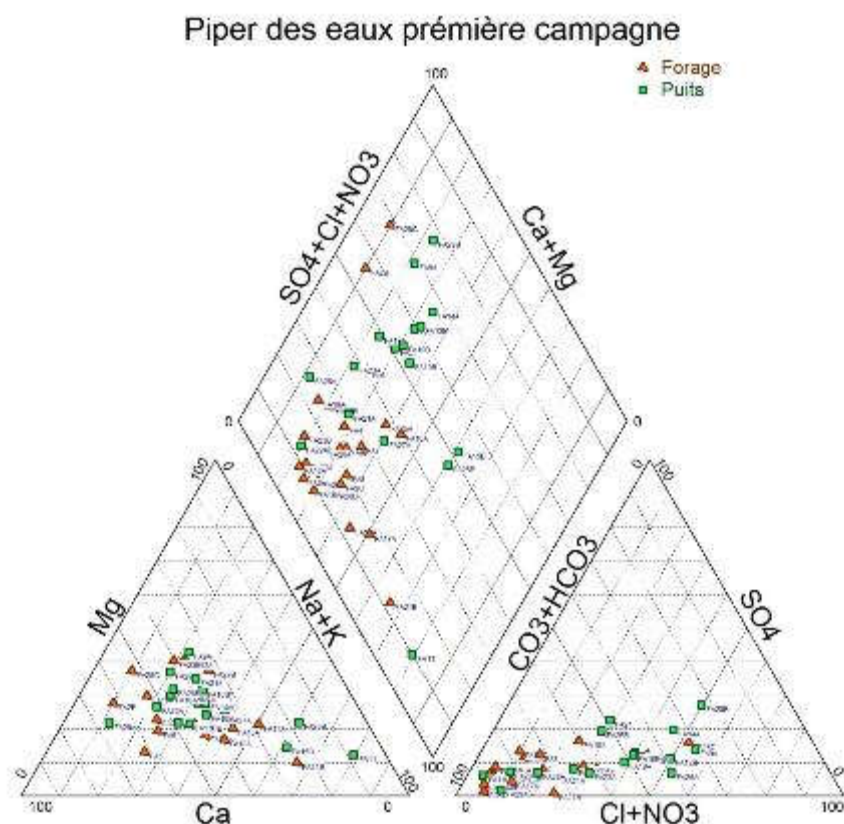


Figure 12: Typologie des eaux issues de la campagne 1

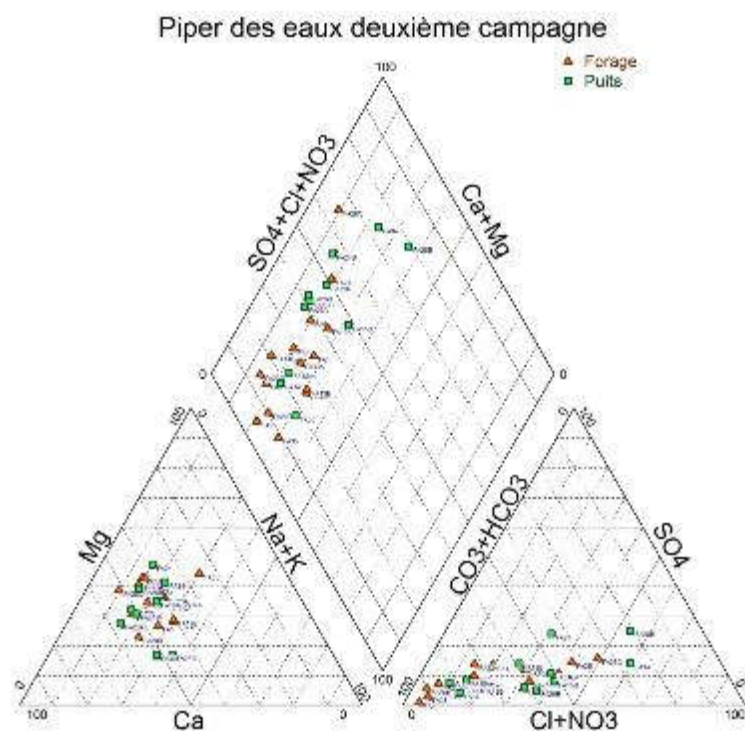


Figure 13: Typologie des eaux issues de la campagne 2

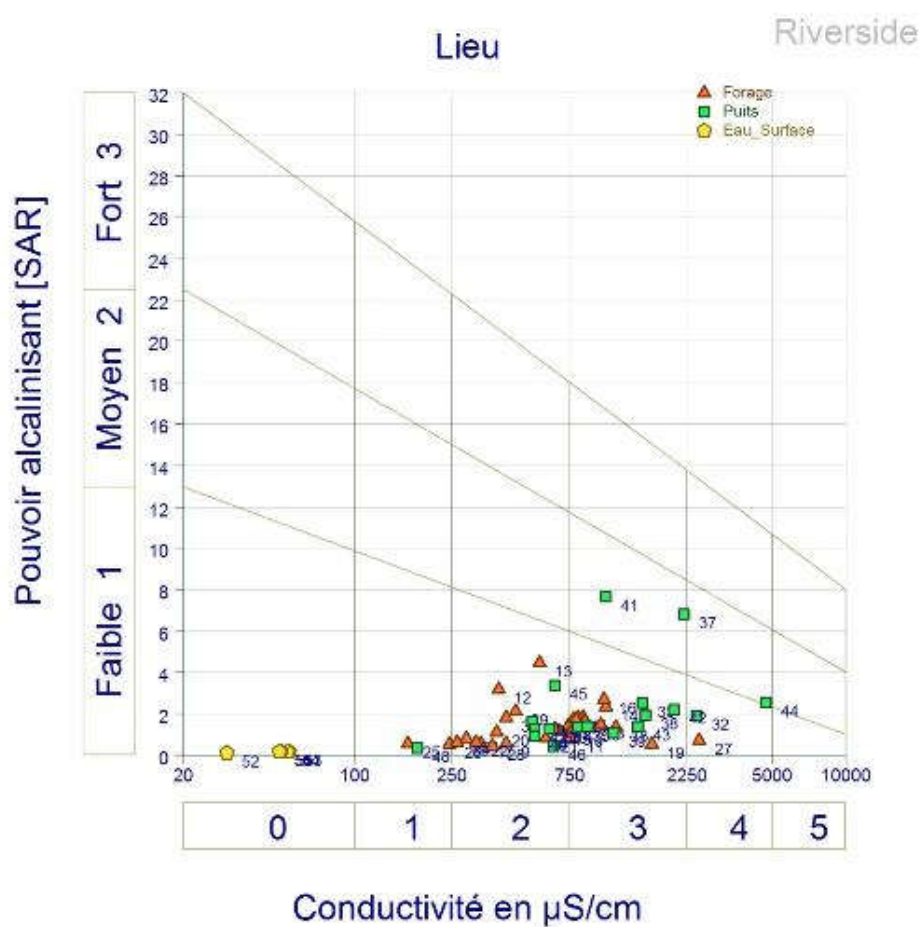


Figure 14: Aptitude des eaux à l'irrigation

4 CHOIX DES SITES D'IMPLANTATION ET CONCEPTION DU CAPTAGE

Dans le cadre du projet, des travaux de réalisations de 10 ouvrages de profondeur maximale de 50m constitués de 5 piézomètres et 5 forages étaient prévus.

Ainsi et au terme des investigations hydrogéologiques et d'une analyse multicritère basée sur les éléments suivants, 11 sites potentiels ont été choisis :

- L'absence d'ouvrages de mesure et d'approvisionnement dans les localités
- L'accessibilité des sites
- Les conditions géométriques de l'horizon fracturé obtenues à partir des investigations géophysiques
- La distribution spatiale des nouveaux ouvrages

Le tableau ci-après décrit les caractéristiques géographiques et géométriques. Les épaisseurs pouvant être captées varient de 17 à 49 m selon les sites. A ce stade des investigations, nous ne pouvons définir les types d'ouvrages (forage ou piézomètre) - les venues d'eau lors des réalisations et les pompages d'essai nous renseigneraient plus sur le choix à prendre pour la désignation des piézomètres et des forages.

Tableau 5: Site potentiel d'implantation des forages

Localité	Ref	X_UTM	Y_UTM	Toit aquifère fracturé (m/sol)	Base aquifère fracturé (m/sol)	Épaisseur
Darou Salam	SE8	800750	1593848	16	36	20
Gangala (sans forage)	SE23	799735	1627855	10	46	36
Gounia	SE25	776124	1640245	11	35	24
Gourel Ari Khara	SE26	795419	1585879	15	33	18
Sinthiou Dialiguel		799722	1609066	10	35	
Balou		797333	1630901		42	
Kidira	SE33	800223	1600239	13	40	27
Nahe	SE35	801479	1595549	18	54	36
Alahina		794707	1585225		60	
Sebou	SE45	805007	1625275	16	51	35

3. BILAN DES ÉTUDES HYDROLOGIQUES- BATHYMETRIE DE LA POCHÉ DE FÁBOLI

Le bilan présenté ici concerne uniquement la partie hydrologie du Rapport R-03

3.1. Données de base

Les données utilisées dans la présente étude proviennent des bases de données de l'IRD, de la Direction Nationale de l'Hydraulique (DNH) du Mali et de l'OMVS dans le cadre de l'actualisation de la monographie hydrologique du fleuve Sénégal. Le rapport R-03 fait l'état des données utilisées pour l'analyse que nous ne reprenons pas ici.

3.2 Analyse des écoulements

Les écoulements sont analysés au pas de temps annuel, mensuel. Le pas de temps journalier est pris en compte par l'analyse des crues et des étiages par les débits caractéristiques. D'une manière globale, les écoulements de la Falémé sont rythmés par la saison des pluies qui démarque deux périodes bien distinctes : la période de crue avec la saison des pluies et celle des étiages avec la saison sèche.

3.2.1 Ecoulements annuels et interannuels

Les apports annuels de la Falémé à ces différentes stations sont illustrés par les figures 18a, b, c, d. Les modules annuels moyens sont consignés dans le tableau 6. Les modules sont très variables d'une année à une autre. Les coefficients de variations sont tous supérieurs à 45% pour toutes les stations. Sur la période 1903-2012, les débits annuels moyens varient entre 48.2 m³/s à Moussala et 157.8 m³/s à Kidira.

Tableau 6 : Modules annuels moyens et écart-types des aux stations hydrologiques de la Falémé.

Station	1903-2012		1903-1967		1968-2012	
	Q moyens (m ³ /s)	Ecart-type (m ³ /s)	Q moyens (m ³ /s)	Ecart-type (m ³ /s)	Q moyens (m ³ /s)	Ecart-type (m ³ /s)
Moussala	48.2	23.7	61.2	20.9	29.1	11.4
Fadougou	88.0	41.6	111.5	35.1	53.129	20.7
Gourbassi	127.0	62.2	161.2	53.4	76.3	32.9
Kidira	157.8	83.8	201.9	76.5	92.6	40.5

Deux séquences nettes apparaissent sur ces graphiques :

- De 1903 à 1967 : phase à forte hydraulité (excédentaire) sur l'ensemble du bassin malgré les courtes séquences des sécheresses de 1911-1915 et 1941-1944. Les modules moyens (Tableau 10) excèdent de plus de 25% (Kidira, 27%) le module interannuel.
- De 1968 à 2012 : phase entièrement sèche, à très faible hydraulité (déficitaire) avec une réduction de 40% des apports de la Falémé à toutes les stations. Cette situation explique le tarissement de plus en plus précoce de la Falémé, même à la station de Kidira. On note pour la dernière phase une amélioration des écoulements à partir de 1994 mais sans retour à l'hydraulité d'avant la sécheresse.

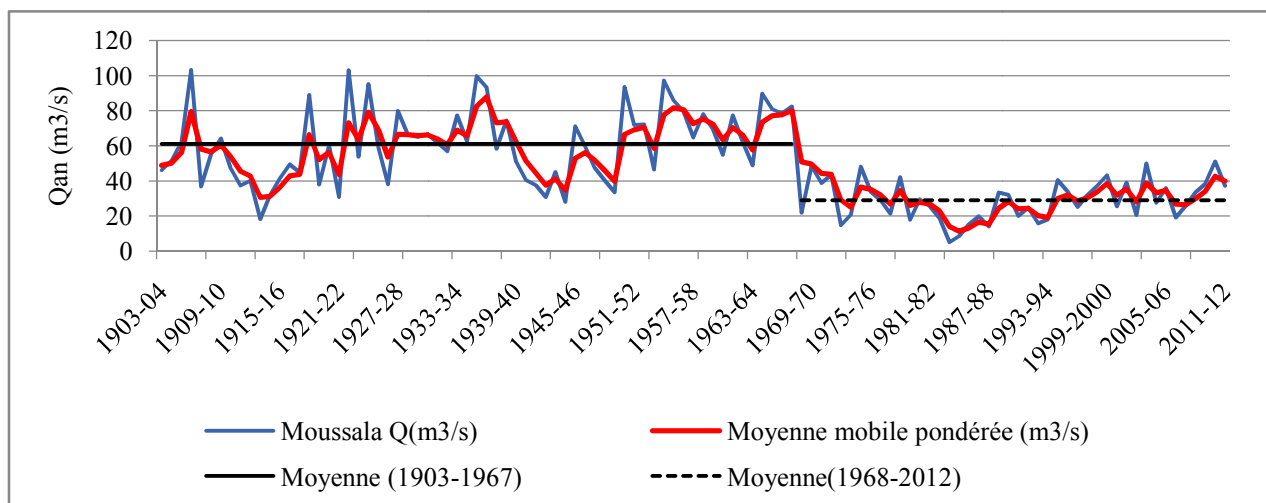


Figure 15: Bassin versant de la Falémé – Variations des modules (m³/s) de la Falémé à Moussala de 1903 à 2012.

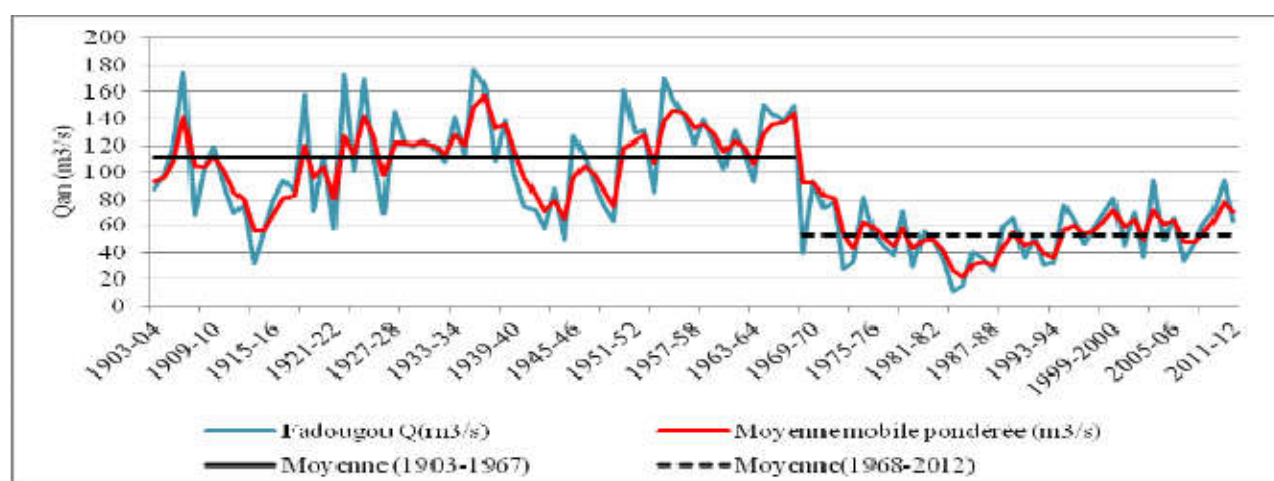


Figure 16 : Bassin versant de la Falémé – Variations des modules (m³/s) de la Falémé à Fadougou de 1903 à 2012.

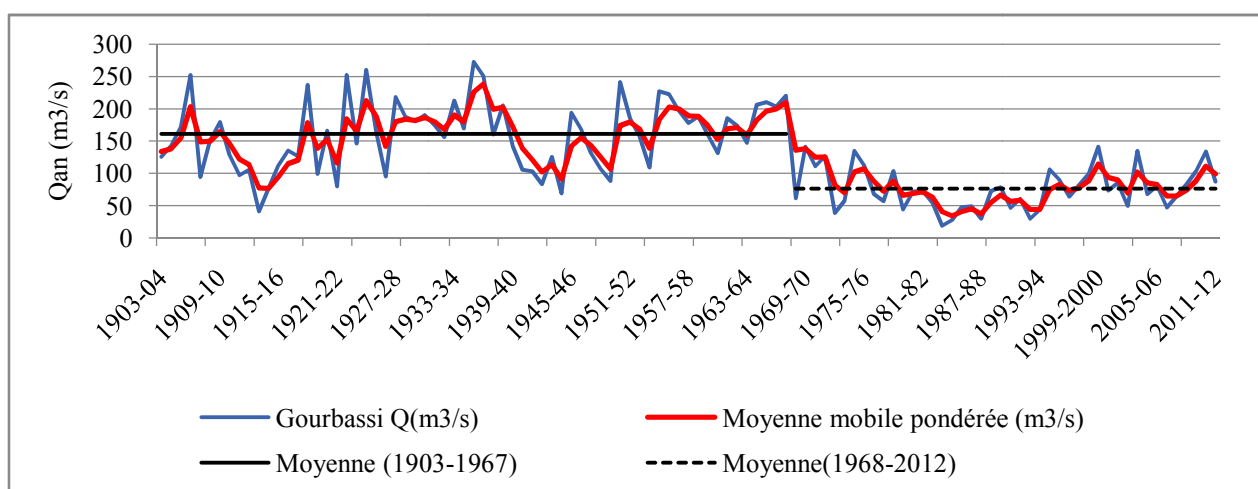


Figure 17 : Bassin versant de la Falémé – Variations des modules (m³/s) de la Falémé à Gourbassi de 1903 à 2012

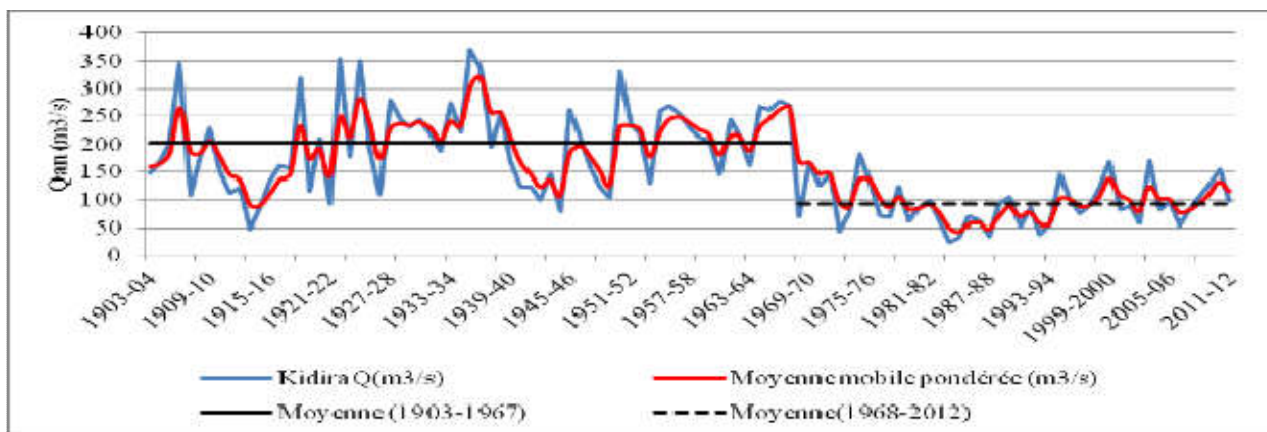


Figure 18 : Bassin versant de la Falémé – Variations des modules (m^3/s) de la Falémé à Kidira de 1903 à 2012.

3.2.2 Répartition mensuelle des écoulements

La division de l'année en deux saisons, sèche et pluvieuse, se répercute sur l'année hydrologique dont le découpage en est la résultante. Le tableau 7 donne la répartition du module annuel en débits mensuels moyens et montre l'essentiel de l'écoulement est concentré sur trois août, septembre et octobre, le mois de juillet arrivant en quatrième position. Ces quatre mois concentrent 90 à 92% des apports annuels de la Falémé (Fig. 19). Ce déséquilibre dans la répartition des disponibilités en eau impacte fortement toutes les activités économiques dans le bassin.

Tableau 7 : Bassin versant de la Falémé—Débits mensuels moyens (m³/s) à Moussala, Fadougou, Gourbassi et Kidira

Moussala	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Module (m³/s)
Qmoyens (m ³ /s)	0.7	7.4	47.1	178.1	202.3	89.3	29.0	12.0	5.8	2.7	1.1	0.6	48.2
Q maximum	11.7	57.6	168.2	622.1	670.3	386.4	120.4	35.7	18.0	10.2	4.4	2.3	103.1
Q 3 (75%)	0.9	10.7	63.5	231.7	253.6	117.2	40.6	16.1	8.3	3.6	1.4	0.9	64.2
Q2 (médian)	0.8	4.9	40.5	155.4	184.4	73.8	23.4	11.6	5.3	2.1	0.9	0.9	43.3
Q1 (25%)	0.0	1.3	23.9	116.1	130.5	48.3	14.1	6.4	2.9	0.9	0.1	0.0	30.9
Q minimum	0.0	0.0	0.9	14.1	19.6	12.8	1.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	5.2
CMD	0.015	0.153	0.977	3.694	4.196	1.852	0.601	0.248	0.121	0.055	0.023	0.012	
Ecart-Type	1.4	8.7	31.9	104.5	108.2	62.2	20.5	7.5	4.2	2.3	1.1	0.5	23.7
Coef.Variation	1.86	1.18	0.68	0.59	0.53	0.70	0.71	0.63	0.71	0.88	1.02	0.93	0.49
Fadougou	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Module (m³/s)
Qmoyens (m ³ /s)	1.8	13.0	83.7	325.4	372.2	160.8	51.2	22.2	11.4	5.6	2.7	1.6	88.0
Q maximum	21.0	98.7	318.7	952.2	1015.0	634.7	227.7	62.6	32.8	18.9	8.7	4.7	176.7
Q 3 (75%)	2.3	18.6	111.0	431.9	488.6	203.8	67.9	29.0	15.2	7.1	3.1	2.3	119.5
Q2 (médian)	1.9	8.0	74.4	303.1	350.0	131.7	42.3	20.9	10.2	4.5	2.3	2.3	81.2
Q1 (25%)	0.1	2.6	42.3	215.4	238.5	81.5	26.3	12.3	6.1	2.8	1.2	0.4	57.2
Q minimum	0.0	0.0	10.0	28.0	34.0	25.4	4.2	1.9	1.2	0.4	0.0	0.0	11.4
CMD	0.020	0.148	0.952	3.697	4.230	1.827	0.582	0.252	0.129	0.064	0.030	0.018	
Ecart-Type	2.5	14.9	57.6	173.2	181.9	112.8	35.1	12.9	7.2	4.1	2.1	1.1	41.4
Coef.Variation	1.39	1.14	0.69	0.53	0.49	0.70	0.69	0.58	0.63	0.73	0.77	0.73	0.47
Gourbassi	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Module (m³/s)
Qmoyens (m ³ /s)	1.2	13.3	102.4	458.1	583.1	244.7	68.6	26.1	12.5	5.8	2.3	1.1	127.1
Q maximum	20.4	130.2	438.0	1338.0	1453.0	960.4	354.5	67.9	33.9	19.6	9.8	4.2	272.6
Q 3 (75%)	1.6	17.7	133.2	608.5	777.9	302.0	87.4	34.1	17.6	7.9	2.9	1.6	172.8
Q2 (médian)	0.9	6.9	86.9	429.1	558.3	197.3	57.6	24.9	11.5	4.6	1.8	1.6	125.3
Q1 (25%)	0.0	2.1	46.8	279.7	357.7	133.8	34.2	13.9	5.9	2.3	0.6	0.0	77.6
Q minimum	0.0	0.0	8.5	55.1	65.9	38.0	7.4	1.4	0.2	0.0	0.0	0.0	19.0
CMD	0.01	0.10	0.81	3.61	4.59	1.93	0.54	0.21	0.10	0.05	0.02	0.01	
Ecart-Type	2.26	17.59	75.60	257.67	294.64	170.04	50.30	15.69	8.29	4.71	2.29	0.96	61.96
Coef.Variation	1.94	1.33	0.74	0.56	0.51	0.69	0.73	0.60	0.66	0.81	0.98	0.91	0.49
Kidira	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Module (m³/s)
Qmoyens (m ³ /s)	0.4	12.9	111.6	550.5	772.9	310.8	81.9	30.1	13.1	5.4	1.6	0.2	158.1
Q maximum	19.0	143.1	483.6	1978.0	2284.0	1617.0	453.3	83.1	38.8	24.1	12.1	4.4	372.3
Q 3 (75%)	0.0	18.5	145.4	714.3	1008.8	383.0	105.4	39.7	18.5	8.1	1.9	0.0	215.6
Q2 (médian)	0.0	5.6	90.9	476.9	674.8	245.8	68.1	28.6	12.3	4.5	0.6	0.0	146.4
Q1 (25%)	0.0	0.8	58.5	318.7	426.2	165.2	39.7	16.2	6.3	1.2	0.0	0.0	91.8
Q minimum	0.0	0.0	6.1	62.0	88.2	42.3	7.9	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	23.9
CMD	0.002	0.082	0.706	3.482	4.888	1.966	0.518	0.191	0.083	0.034	0.010	0.001	
Ecart-Type	2.07	18.67	78.46	339.10	454.39	244.93	62.22	18.27	9.23	5.11	2.30	0.59	83.07
Coef.Variation	5.88	1.44	0.70	0.62	0.59	0.79	0.76	0.61	0.70	0.94	1.46	2.66	0.53

Cette concentration est accentuée par la part prépondérante des apports de septembre qui font plus que le quadruple du module annuel. Les années à fort déficit pluviométrique, notamment dans le haut bassin, le tarissement total de la Falémé peut survenir précocement (31 janvier 1984 ; 13 février 1994 par exemple) comme le montre la Figure 26 présentant les quantiles des débits mensuels moyens. Signalons que ce bassin dont le régime des écoulements reste naturel et intermittent, quelque fois, est inscrit dans le programme des ouvrages de seconde génération de l'Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal (OMVS).

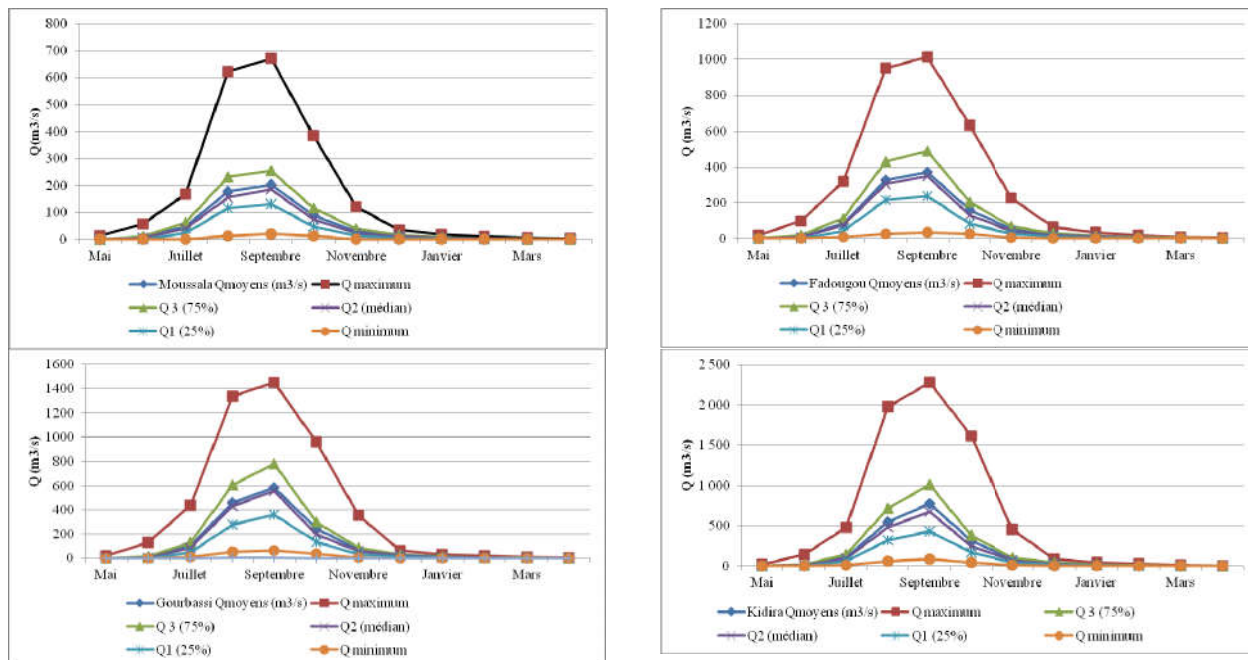


Figure 19 : Débits mensuels moyens (m^3/s) à Moussala, Fadougou, Gourbassi et Kidira

3.2.3 Caractérisation des débits journaliers

Les débits journaliers sont des réponses aux impulsions pluviométriques quotidiennes survenant sur le bassin. Bien que la taille du bassin tende à « gommer » en lissant les réactions, les hydrogrammes aux différentes stations montrent de fortes variations quotidiennes des débits particulièrement quand il y a des poses pluviométriques. Les variations des débits journaliers pour les stations de Gourbassi, situées respectivement en amont et en aval de la poche de Faboli, sont illustrées dans les Figures 20. Sont représentées quatre années hydrologiques caractéristiques montrant la très grande variabilité des débits journaliers mais également les configurations des années hydrologiques, fonction de la saison des pluies :

L'année hydrologique 1967-1968 : très excédentaire avec des débits maxima de $1962 m^3/s$ (28/09/1967) à Kidira et $1370 m^3/s$ (07/09/1967) à Gourbassi alors que les débits minima sont de 0 et $078 m^3/s$ aux deux stations.

L'année hydrologique 1994-1995 a des écoulements moyens avec $775.3 m^3/s$ et $716.4 m^3/s$ à Kidira et Gourbassi avec un assèchement de la Falémé. On remarquera le faible écart entre les deux débits qui laisse supposer une faible contribution du bassin intermédiaire.

Les années 1983-1984 et 2002-2003 : années à hydraulicité les plus observées dans le bassin. L'année 2002-2003 vient rappeler que la sécheresse n'est peut-être pas terminée. La station de Kidira était à sec dès la fin de février 1984 alors que ses débits étaient insignifiants à la même date en 2003 ($0.7 m^3/s$). A la station de Gourbassi, l'assèchement total survenu respectivement 23/01/1984 et le 27/03/2003.

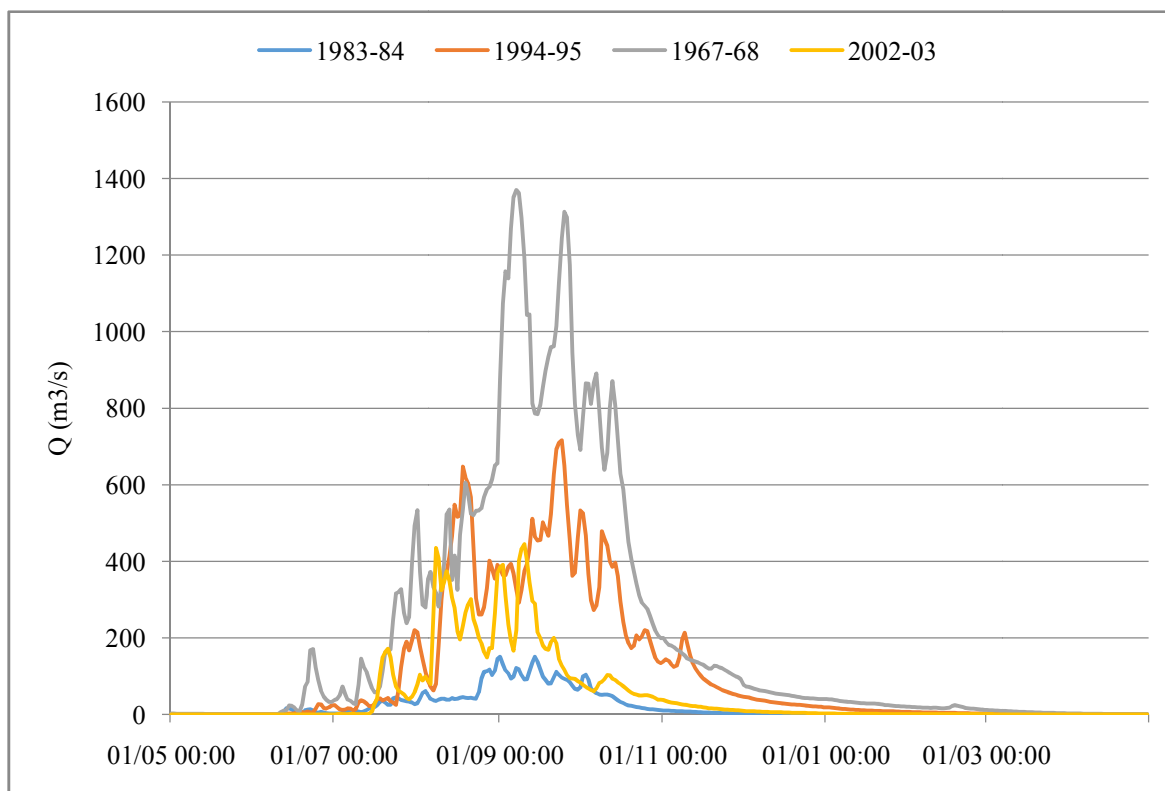


Figure 20 : Variations des débits journaliers et comparaison des hydrogrammes de 4 années hydrologiques à la station de Gourbassi.

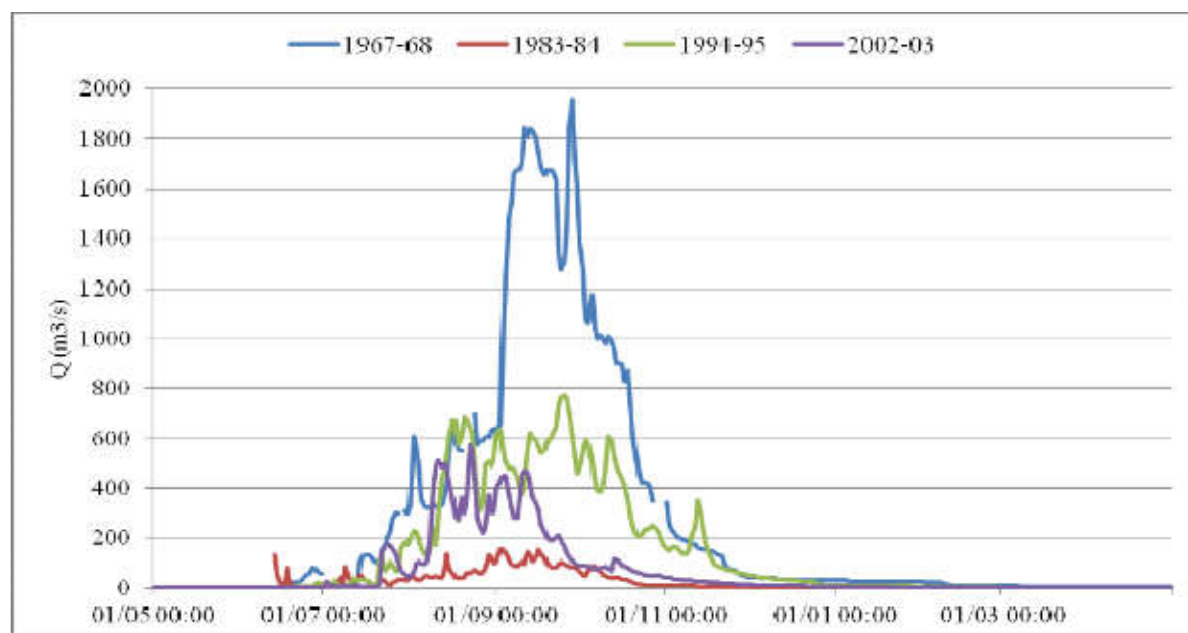


Figure 21 : Variations des débits journaliers et comparaison des hydrogrammes de 4 années hydrologiques à la station de Kidira.

3.2.4. Les débits caractéristiques de crue et d'étiage

Les débits caractéristiques de crue et d'étiages illustrent mieux cette forte variabilité des débits journaliers et la précarité des disponibilités des ressources en eaux dans le bassin. Les débits sont classés dans l'ordre décroissant (tableau 8 et figure 21). Comme le montre le tableau 8, si les débits maxima sont importants à toutes les stations, leur décroissance est très rapide. Au sixième mois de l'année hydrologique, le débit de la Falémé à Gourbassi passe de 1001.3 m³/s à 19.8 m³/s ; à Kidira, il n'est plus que 21.4 m³/s alors que le maximum était de 11.3 m³/s. Au neuvième

mois, le débit est inférieur à 3 m³/s. Cela veut dire que 3 mois durant, le bassin est dans une situation de précarité absolue. Si on tient compte du débit écologique, on peut considérer qu'à la médiane (6 mois), la situation des ressources devient critique. En toute logique, comme cela apparaît sur la figure, passer la médiane, la Falémé est dans l'impossibilité d'assurer les besoins en eaux des populations riveraines.

Tableau 8 : Débits caractéristiques des stations hydrologiques de la Falémé

	DMAX (m ³ /s)	DCC_10j	DC1	DC3	Médiane	DC9	DCE_20j	DCE_10j	DMIN
Jours	1	10	30.5	91.5	183 (6 mois)	274.5	345	355	365
Kidira	1361.3	1050.7	666.2	158.5	21.4	1.6	0.0	0.0	0.0
Gourbassi	1001.3	774.0	527.0	137.1	19.8	2.5	0.8	0.8	0.7
Fadougou	705.2	511.5	345.2	101.5	18.1	3.0	1.3	1.2	1.2
Moussala	418.7	286.2	180.5	58.8	9.8	1.3	0.5	0.4	0.4

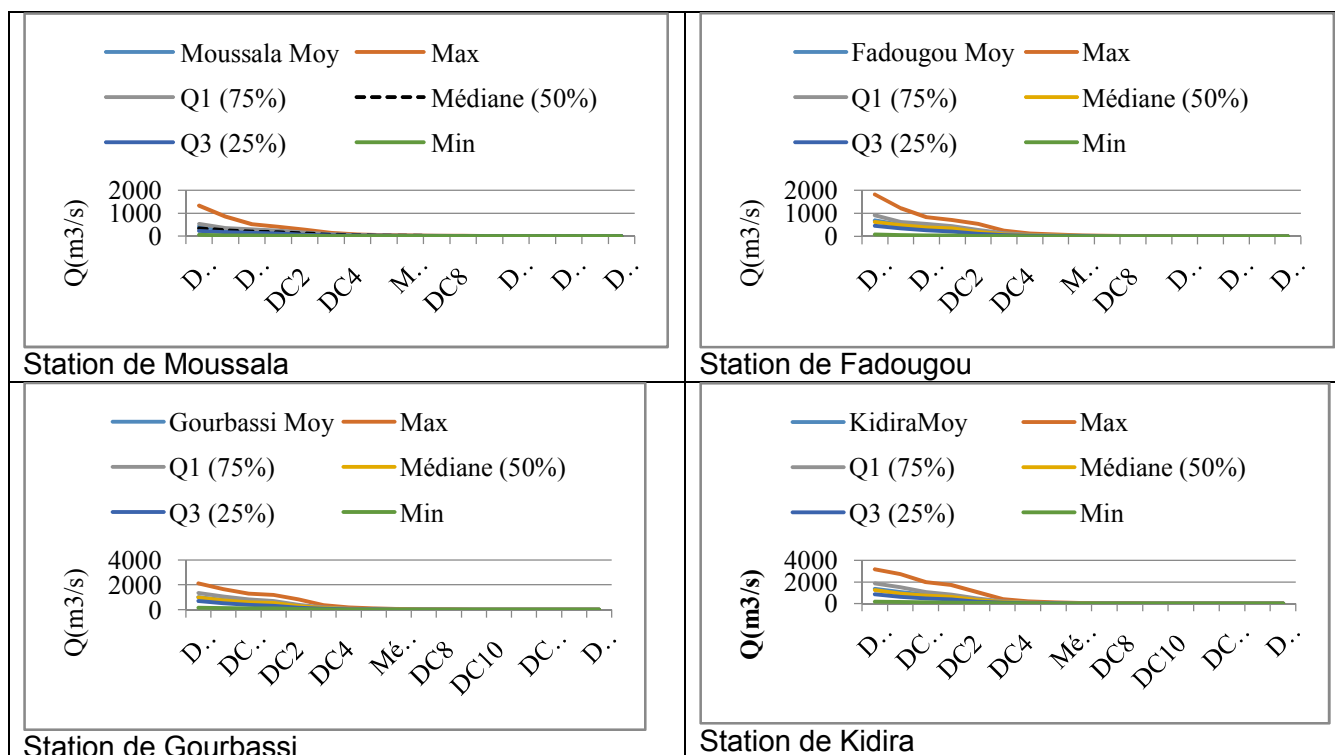


Figure 22 : Débits caractéristiques de crues et d'étiages de Moussala, Fadougou, Gourbassi et Kidira

On comprend alors la segmentation des écoulements selon les biefs en fonction de la capacité des nappes sollicitées par le cours d'eau. Les restitutions des nappes en direction de la Falémé et ses affluents dépendront du niveau de recharge de ces derniers. L'analyse des hydrogrammes annuels montrent l'arrêt de l'écoulement commence en amont du bassin à la station de Moussala puis à Fadougou. La station de Gourbassi, en amont de la poche tarit après celle de Kidira ce qui suppose que le soutien des nappes y est plus important.

Il en résulte une très mauvaise répartition temporelle des ressources en eau dans le bassin de la Falémé. En effet, entre juin et décembre, la Falémé écoule 98% de ses disponibilités en eau de surface au moment où la pression sur ces ressources est quasi nulle, c'est-à-dire la saison des pluies et la fin de celle-ci. Entre janvier et mai, il ne reste plus que 2% de disponibilités face à des besoins amplifiés par la saison sèche. Ces faibles apports du cours d'eau interdisent toutes activités de type agricole ou pastoral. La poche de Faboli, sur ces 20 à 24 km de longueur, reste alors la seule zone de concentration appréciable des ressources en eau de surface et par conséquence celle des activités pastorales sur son pourtour.

3.3. Bathymétrie de la poche de Faboli

La poche de Faboli est située sur la Falémé au sud de Kidira. Elle s'étend du village de Gourel Ari Hara au village de Fanira soit sur une longueur total de 23 kilomètres (cf figure 22. Elle se présente comme une dépression naturellement pérenne dans le lit du cours d'eau. En réalité, il s'agit de deux poches séparées par une zone rocheuse de deux (2 Km) de long. La séparation est nette en saison sèche, elle l'est moins en saison des pluies. Les différents seuils limitant les poches sont submersibles en saison des pluies, pendant le transit de grands débits. L'ensemble constitue une importante réserve d'eau douce permettant d'alimenter les populations et le bétail, en particulier, en saison sèche, période pendant laquelle l'accès à l'eau constitue une des difficultés majeures dans cette région du socle.

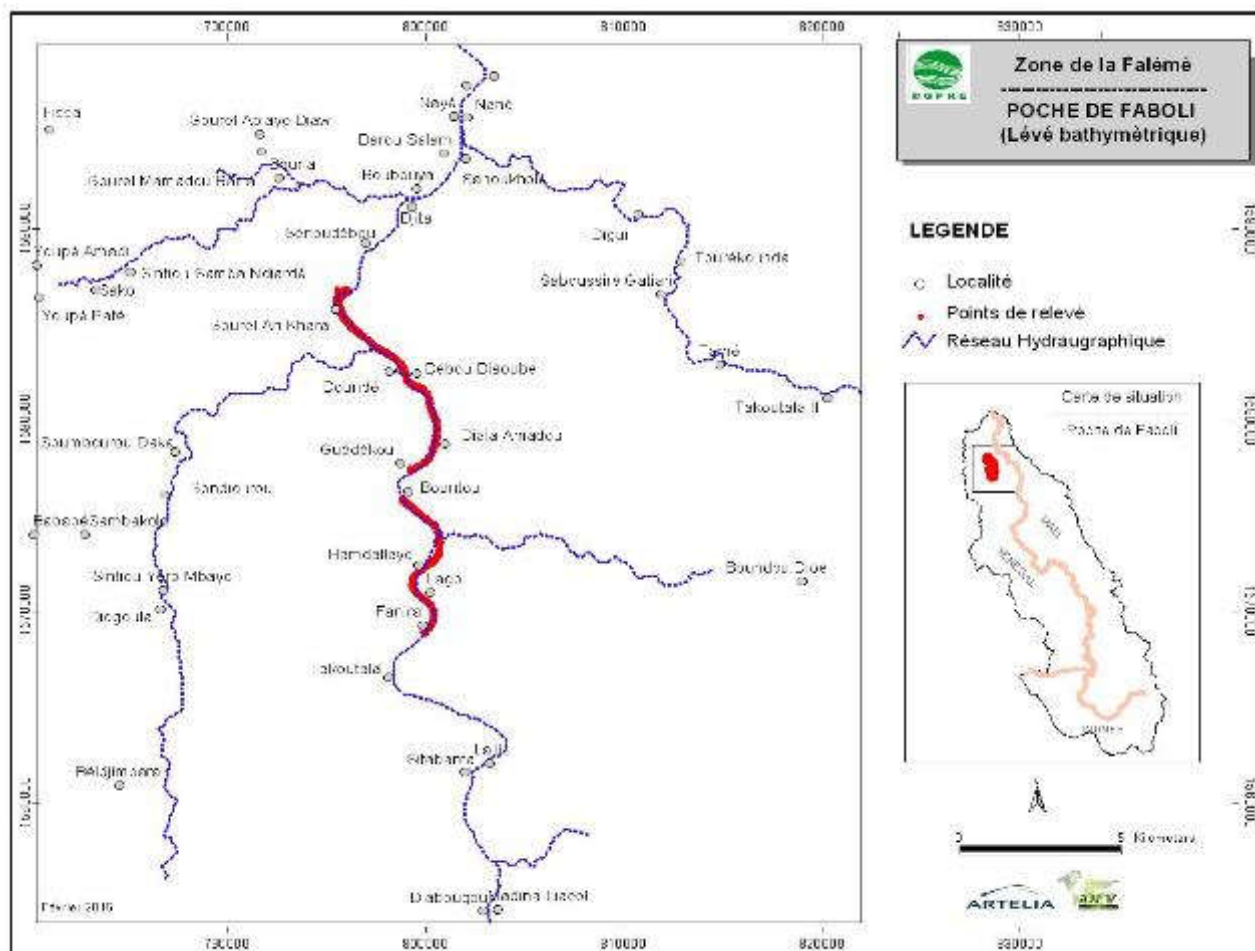


Figure 23: Carte de présentation de la poche de Faboli

Les levés bathymétriques ont été réalisés avec :

- Un Echosondeur GARMIN GPSMAP 421s alimenté par une batterie de 12V. Le dispositif de mesure, notamment la sonde a été fixée sur une barque en aluminium avec une profondeur d'immersion de 0,2 mètre. Par ailleurs, l'instrument de mesure permet de relever pour un point, les coordonnées (UTM) et la profondeur. La profondeur totale s'obtient en ajoutant à la lecture la valeur 0,2 m;
- Deux (02) GPS de poche pour relever les coordonnées des points de rives qui correspondent à la profondeur 0 m;
- Une station totale et un GPS différentiel pour les levés topographiques et la polygonale;
- Des gilets de sauvetage;
- Un moteur 25 CV.

La démarche pour l'exécution des travaux porte sur la mesure des profondeurs et des coordonnées géographiques des points en suivant des transects prédéfinis, équidistants de 250 m, réparties sur les 23 km. L'équidistance entre les transects a été définie par l'équipe topographique en implantant des repères peints sur la rive du cours d'eau tous les 250 mètres. En cas de perte d'un de ces repères l'équipe bathymétrique faisait des mesures au GPS, à partir du dernier transect. La distance entre deux points de mesure sur un transect est variable selon la variabilité du lit (changement rapide ou pas) et elle est souvent de l'ordre de 2 à 3 mètres. En plus de ces transects, des mesures ont été faites chaque fois que l'équipe se déplace d'un transect à un autre, sur les chemins d'aller et retour. Un profil en long a été aussi réalisé.

Les transects obtenus par les levés bathymétriques ont été complétés par l'équipe topographique pour cerner au mieux la configuration du lit et ce sur un pas de deux (02) kilomètres.

Pendant les opérations de sondage, le niveau du plan d'eau a été régulièrement enregistré à la station limnimétrique de Gourel Ari Hara (installée par la SAED) et non relevée par les services compétents. La batterie d'échelle de cette station doit être réhabilitée. La variation du plan d'eau à l'échelle est très faible (moins d'un cm/jour), comparé à l'ordre de précision de l'appareil.

Malheureusement la récupération des points (sous forme de Waypoints) à partir d'un câble ou d'une carte mémoire n'a pas été possible. Les points ont donc été saisis dans un fichier Excel. La valeur 0,2 m a été rajoutée à la profondeur mesurée à partir de l'échosondeur. Les levés de la polygonale sur les 23 kilomètres. Les données collectées ont été traitées avec différents outils cartographiques et d'analyse. Les résultats obtenus sont analysés dans les paragraphes suivants:

3.3.1. Analyse des résultats

Pour une bonne visualisation de l'image bathymétrique, nous avons opté de représenter les profondeurs. Il s'agit donc, sur un tronçon du cours d'eau (Fig. 23) de visualiser les profondeurs du cours d'eau. Ceci s'explique par plusieurs raisons :

- la longueur (23 Km) de la poche est très importante comparée à la largeur qui est en moyenne de 150 mètres,
- le cours d'eau présente beaucoup de virages
- la variation altimétrique est plus visible si l'on représente les profondeurs plutôt que les côtes

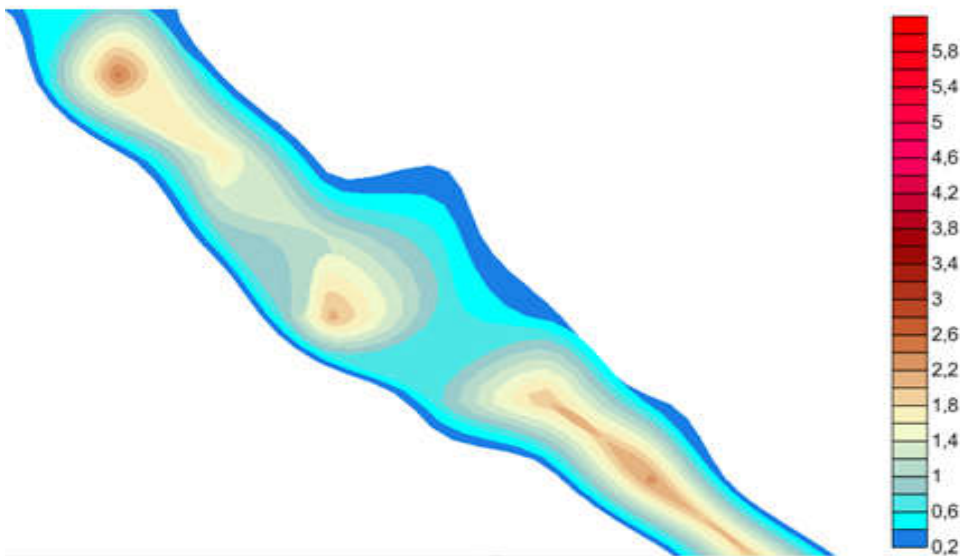
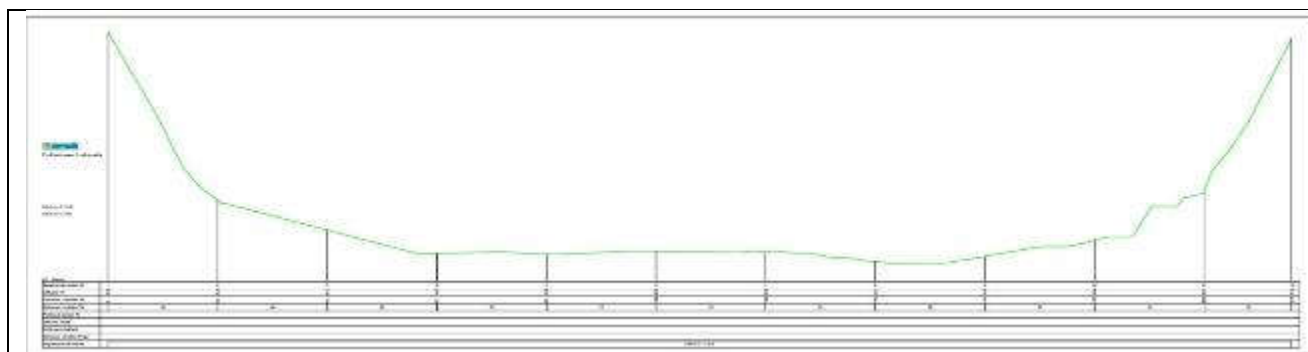


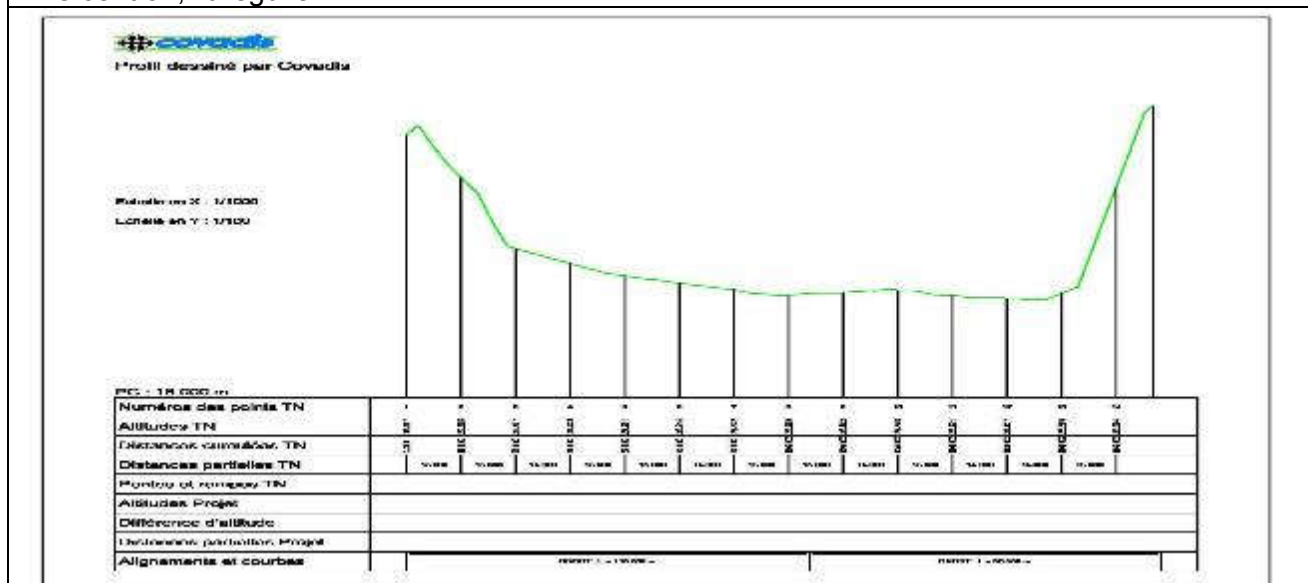
Figure 24: Image prise d'écran de la représentation bathymétrique (tronçon de 2,1 kilomètres de long), avec échelle de profondeur en mètres

Le tracé du profil en long montre un lit assez irrégulier avec de petites poches d'eau. Il met en évidence aussi la zone rocheuse sur les 2 kilomètres environ à la hauteur de Guédékou. Cette zone constitue donc une zone de rupture entre deux poches (avec des côtes atteignant 28 mètres). Sur le terrain lors des travaux de bathymétrie, l'équipe a constaté l'existence d'un écoulement, qui assure le passage d'un filet d'eau de la poche amont à la poche aval.

Les profils en travers (Fig. 24) montrent d'abord l'existence d'une pente abrupte qui se modère, tendant à devenir nul (lit plat) vers le centre du lit (talweg). Sur quelques profils en travers, on remarque que l'axe d'écoulement se rapproche plus de berges. Ceci s'explique par les nombreuses zones rocheuses qui longent le lit du cours d'eau. Les profils en travers ci-dessous illustrent la configuration générale des sections du cours d'eau.



Axe central, lit régulier



Profil en travers entre les points (795995 ; 1586643) et (795964 ; 1586749) : axe du cours d'eau légèrement décalé vers la rive gauche

Figure 25: profil transversal dans la poche de Faboli

Courbe hauteur-volume

Les données traitées avec Excel ont été importées sur Surfer 11. Cet outil nous a permis de générer par interpolation les courbes de niveau. La partie en dehors de la limite du cours d'eau a été coupée via l'outil Blank du logiciel (« Grid-Blank »).

Les résultats du calcul sont consignés dans un fichier exportable sous format Word (RTF). La variation de la côte Z permet d'obtenir la courbe hauteur-volume. Pour la côte 26,52 m (côte correspondant à la côte moyenne du plan d'eau au moment des levées de la poche amont (entre Fanira et Guédékou), qui est légèrement différente de la côte moyenne du plan d'eau de la poche aval (entre Guédékou et Gourel Ari Hara) qui est de 25,701, le volume de stockage des deux poches est de 7,1 millions de mètres cubes d'eau. Une légère diminution de la côte de 0,7

engendre une diminution du volume de 2,5 millions de mètres cubes d'eau. On peut en conclure que les faibles profondeurs ont un rôle prédominant dans le stockage d'eau de ces poches. D'autre part, la part de profondeur supérieure à 2 mètres n'est que de 550.000 mètres cubes d'eau. Cet aspect peut s'expliquer par deux facteurs : les pentes abruptes combinées au nombre limité de zones profondes. Le résultat de la bathymétrie de la poche à l'étiage montre une diminution du niveau du plan d'eau de 1,21 mètre avec un volume de stock à l'étiage de 2,35 millions de mètres cubes. Le tableau 9 et la figure 23 suivants montrent l'évolution de la surface et du volume en fonction de la côte avec les commentaires relatifs au plan d'eau et aux ouvrages.

Tableau 8: évolution des volumes d'eau en fonction des cotes de plan d'eau

Côte (m)	Volume (m3)	Surface 2D (m2)	Commentaires	Côte (m)	Volume (m3)	Surface 2D (m2)	Commentaires
18,851	0	0		27,5	8 773 803	3 369 451	
19	1	27		28	10 494 766	3 512 112	Plan d'eau rehaussé de 1 m par des ouvrages
19,5	146	662		28,5	12 284 977	3 648 110	
20	754	1 917		29	14 142 911	3 783 847	Plan d'eau rehaussé de 2 m par des ouvrages
20,5	2 276	4 699		29,5	16 068 422	3 917 085	
21	6 915	13 983		30	18 062 395	4 064 868	
21,5	16 351	23 618		30,5	20 132 651	4 214 374	
22	30 771	34 329		31	22 274 488	4 349 974	
22,5	51 939	54 395		31,5	24 481 733	4 465 225	
23	92 798	129 642		32	26 731 471	4 525 869	
23,5	211 133	377 384		32,5	29 004 309	4 562 660	
24	501 321	812 596		33	31 294 134	4 594 943	
24,5	1 015 501	1 253 733		33,5	33 599 616	4 626 517	
25	1 776 943	1 822 233		34	35 918 230	4 647 240	
25,3	2 378 437	2 176 909	Côte du plan d'eau à l'étiage	34,5	38 245 518	4 661 357	
25,5	2 834 283	2 379 164		35	40 579 491	4 673 982	
26	4 129 020	2 759 464		35,5	42 918 631	4 682 283	
26,5	5 573 330	3 011 669		36	45 261 747	4 690 919	
27	7 128 920	3 202 624	Côte du plan d'eau lors de la bathymétrie	36,5	47 608 807	4 697 061	
				36,538	47 787 296	4 697 107	

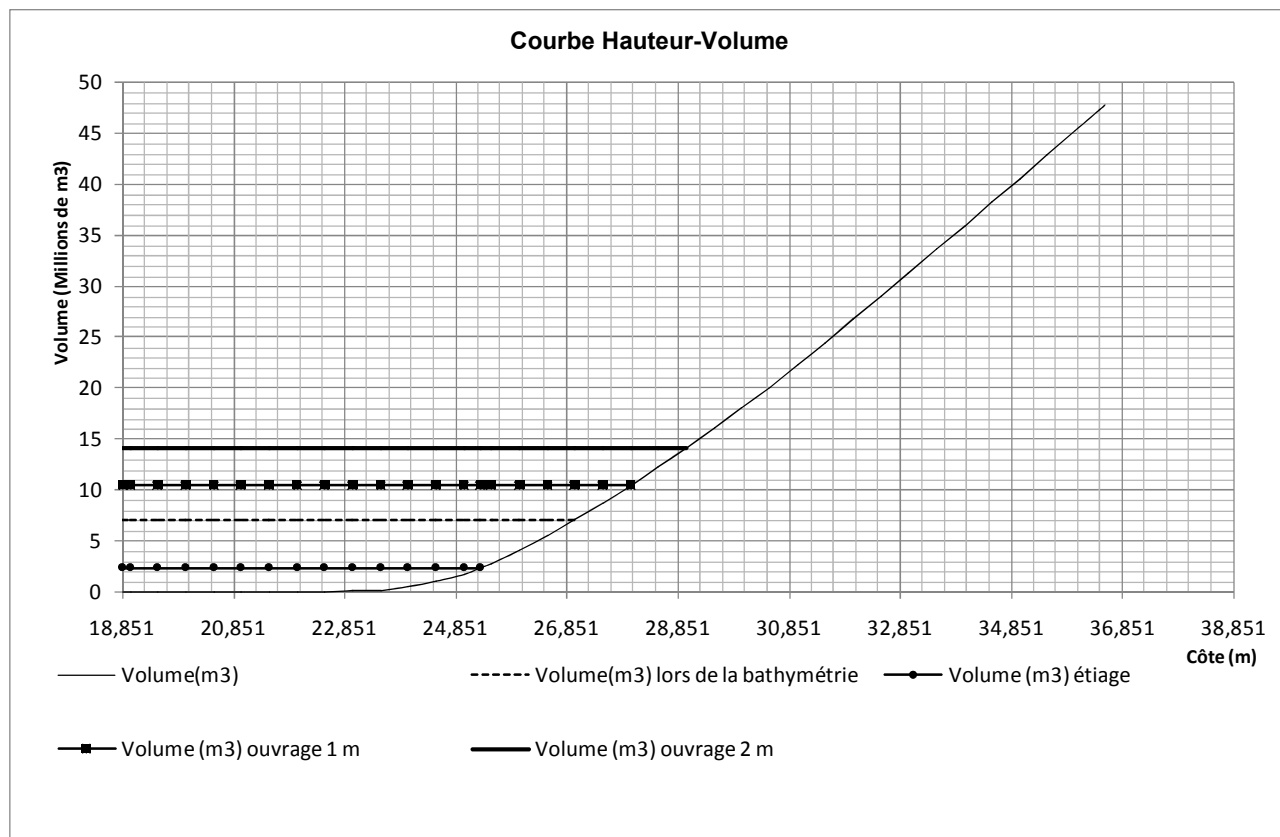


Figure 26: Courbe Cote (m)-Volume(M3) de la poche de Faboli

Analyse du comportement de la poche en termes de remplissage et de vidange

La cote IGN de la station hydrométrique de Kidira est 19,605 m. Toutes les cotes limnimétriques de Kidira ont été transformées en cotes IGN pour les comparer à celle moyenne du seuil aval de la poche de Faboli qui est à 24,27 m IGN (figure 38). Quand la cote IGN de Kidira est supérieure à celle du seuil aval de la poche cela signifie que la poche est entièrement remplie et mise en charge de la nappe alluviale. Quand la cote de Kidira lui est inférieure, il y a déconnexion de la poche par rapport à la partie aval. Son volume d'eau évolue alors uniquement en fonction des ponctions de l'évaporation sur le plan d'eau, des divers prélèvements et, éventuellement, des apports du bassin amont. Or, on a vu précédemment que l'assèchement de la Falémé à Gourbassi est de plus en plus précoce et dure, en moyenne, ces dernières années près de 3 mois. La figure 25 montre que certaines années, le niveau de l'eau à la station de Kidira n'atteint pas le niveau du seuil de Faboli, ce qui laisse supposer qu'il n'y a pas d'écoulement amont transitant par la poche de Faboli en direction de Kidira et que donc le bief aval à partir de la poche n'est alimenté que par les apports du bassin intermédiaire jusqu'à Kidira.

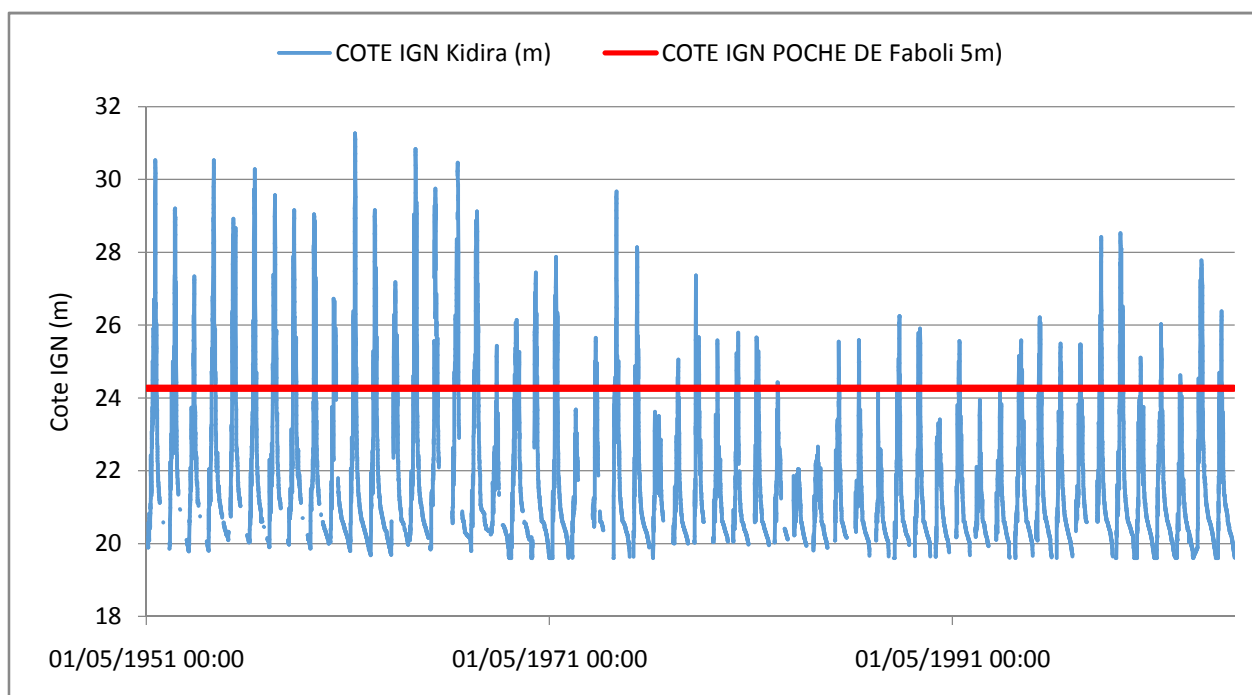


Figure 27: Comparaison niveau seuil aval de Faboli aux cotes IGN de la station de Kidira pour plusieurs années.

Un examen détaillé des limnigrammes montre que même en cours de saison des pluies, la déconnexion entre la poche et le bief aval est possible comme le montre l'exemple de l'année 1994, pourtant très pluvieuse. Il apparaît donc que le remplissage et la mise en charge de la poche de Faboli et sa nappe alluviale est très complexe. On remarque dans la Figure 26 que la côte de la Falémé (Kidira) est souvent en-dessous du niveau de la poche de Faboli. Le niveau d'eau ne passe en dessus que sur un certain nombre de périodes intermittentes. Ces fluctuations sont ponctuées très probablement par les événements pluvieux d'une certaine ampleur.

Des études approfondies de corrélation entre ces événements et le niveau de remplissage de la poche pourront en dire plus sur le comportement hydrologique de la poche.

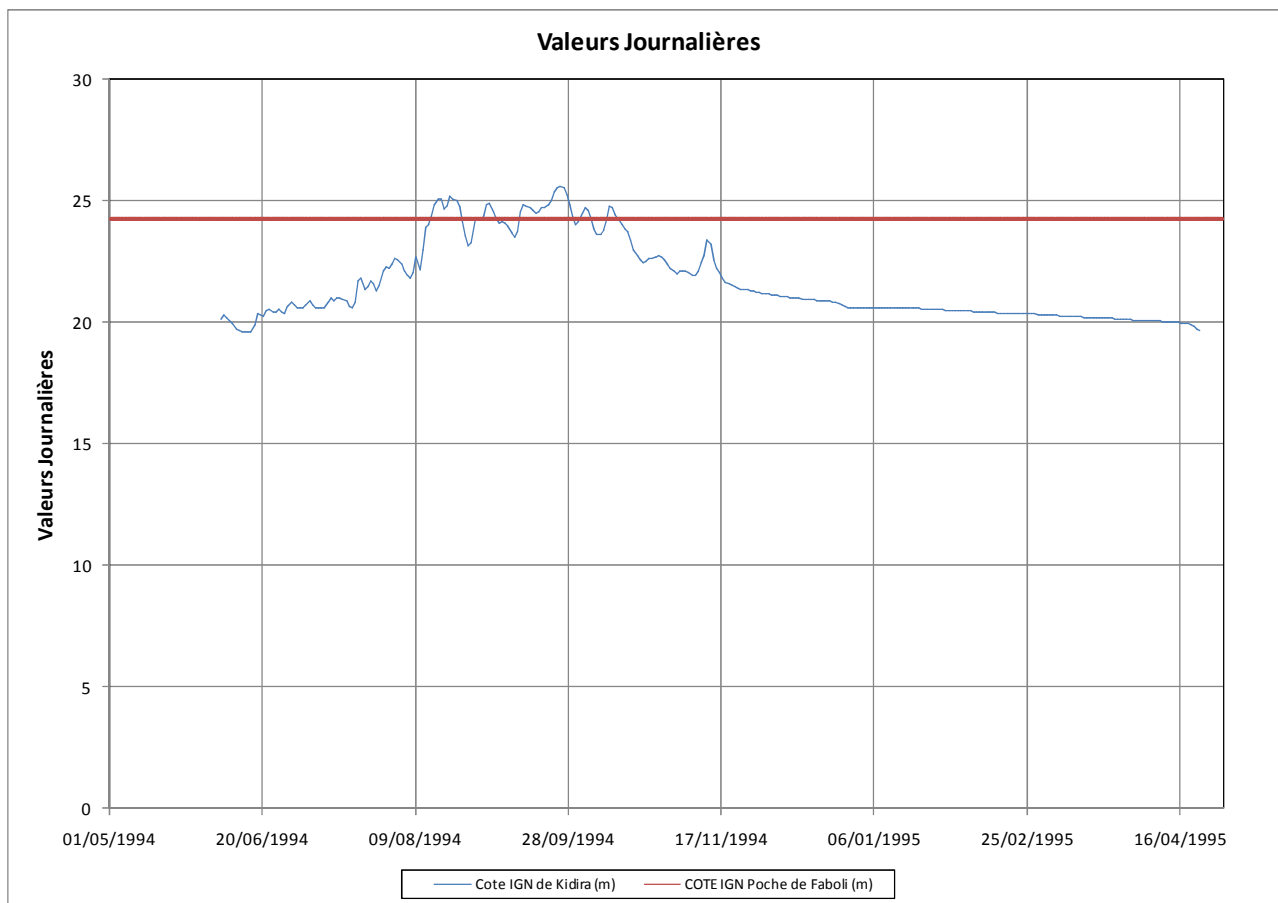


Figure 28: Comparaison niveau seuil aval de Faboli aux cotes IGN de la station de Kidira pour l'année 1994

3.3.2 Gestion de la poche, potentiel mobilisable et recommandations

Pour l'année hydrologique 2014-2015, la déconnexion de la poche est intervenue au courant du mois de Janvier (mi-janvier). L'analyse du potentiel mobilisable en AEP de la poche reposera sur plusieurs hypothèses :

- Les aménagements des 65 hectares rizicoles de la SAED se font en contre saison pendant que la poche est complètement déconnecté du reste de la Falémé ;
- Le flux du cheptel de transhumance est quasi constant sur le long terme avec une durée de séjour moyenne annuelle de deux (02) mois. Cette hypothèse s'explique par l'alternance des périodes sèches et pluvieuses ;
- L'influence du barrage OMVS de Gourbassi (en projet) ne se fait pas sentir sur le remplissage de la poche ;
- Le volume d'évaporation hors de la saison pendant laquelle la poche est déconnecté, sera comptabilisé dans le volume d'eau transitant par la poche. L'évaporation sera donc calculé seulement sur la période de Janvier à Juillet.

Il s'agit donc dans cette partie de faire un bilan du comportement de la poche pour en déduire le volume de stock critique. Les différents facteurs de prélèvement ont été abordés ci-dessus avec chacun les hypothèses requises. Il faut préciser qu'actuellement l'eau de la poche n'est utilisée par les populations autochtones que pour le linge et la vaisselle, donc il n'y a pas de prélèvement. Par ailleurs il y a une faible activité horticole, soit 6,7 hectares. Cette superficie sera comptabilisée dans les calculs comme incluse dans les aménagements rizicoles de la SAED. Le cheptel local a été aussi estimé. Il est par contre très faible comparée au cheptel de transhumance.

Tableau 9: bilan des prélèvements sans ou avec projet SAED

Fonctionnement naturel sans SAED	Fonctionnement avec aménagements SAED
----------------------------------	---------------------------------------

Activités de prélèvement	Volume (m3)	Volume (m3)
Cheptel local	47 836	47 836
Cheptel de transhumance	126 628	126 628
Evapotranspiration	4 657 500	4 657 500
Horticulture (villageoise) et riziculture SAED	0	1 693 440
Total prélèvement	4 831 964	6 525 404
Stock de la poche	2 296 956	603 516

3.4 Besoin en AEP

Les besoins en AEP ont été estimés compte non tenu des ouvrages (forages, puits...). Ceci s'explique par la qualité des eaux de la nappe captée. Dans la zone d'influence de la poche le plus gros village c'est Sénédebou avec 1750 habitants (en 2015) suivi de Fanira (500 habitants). Pour le reste des villages concernés les enquêtes ont montré que la population varie de 100 à 200 habitants. Nous avons considéré une moyenne de 202 habitants par villages. Le taux de croissance démographique national est de 2,7 %. Le tableau ci-dessous récapitule l'évolution du nombre d'habitant dans la zone d'influence de 2015 à 2030.

Tableau 10: Estimation des besoins en AEP

Année	Population	AEP(m3)
2015	3 770	48 162
2020	4 307	55 024
2025	4 921	62 865
2030	5 622	71 822

Les calculs de besoins en eau ont été fait conformément aux OMD avec une dose de 35litre/jour/habitant.

3.5 Analyse des résultats et interprétations

L'analyse des résultats obtenus se fera en tenant compte du plan de mobilisation de l'eau défini dans le cadre du PAGIRE et du code de l'eau qui priorise les prélèvements selon le schéma simplifié suivant : AEP d'abord, cheptel, volume écologique et enfin aménagements.

- En effet, le volume écologique tel que défini dans le PAGIRE constituerait 50% de la réserve soit dans cas de Faboli 3,5 millions de mètres cubes. Le fonctionnement normal (sans AEP, ni aménagements de la SAED) de la poche, lui garantie une réserve de 2,3 millions de mètres cubes d'eau à l'étiage soit un déficit de 1,2 millions par rapport au volume écologique ;
- En faisant intervenir les aménagement de la SAED, il ne restera que 600.000 m3 d'eau en stock à la fin du mois de Mai, soit environ 3 millions de m3 de déficit par rapport au volume écologique.

Ces résultats sont alarmants. Et pose la problématique des aménagement de la SAED en termes de pérennisation de cette poche. A cette analyse, il faudra rajouter le volume nécessaire pour l'AEP, pris à l'horizon 2030 qui est de 70.000 m³.

3.6 Risques de dégradation de la qualité des eaux de surface

Les risques de pollution des eaux de la poche de Faboli par les déchets agricoles sont réels. En effet, la SAED est entrain d'aménager 65 hectares de terres agricoles sur les plateaux. Les systèmes d'intensification de la production agricole à travers les SIPA vont engendrer l'utilisation de quantités importantes d'engrais minéral et de pesticides. Les résidus qui en résulteront seront lessivés et entraînés par les eaux de pluies et de drainage vers la poche. Même si le risque de concentration des polluants pourrait être négligeable pendant la saison des pluies, il n'en demeure

pas moins qu'en saison sèches (étiages), les concentrations pourraient augmenter de façon à créer les conditions d'eutrophisation et de proliférations de végétaux aquatiques du fait des nitrates et des phosphates.

3.7 Recommandations et scénarii

Il est impératif compte tenu, des résultats de la bathymétrie, des aménagements de la SAED et de la confluence du bétail vers la zone de prévoir des solutions. Le lit cours d'eau étant rocheux et présentant du butes (zones de ruptures) en aval, en amont et entre les deux poches à la hauteur de Guédékou de prévoir ces ouvrages. Les résultats montrent qu'en rehaussant le plan d'eau de 1m, la capacité du réservoir augmenterait de 3,4 millions de m³ et en le rehaussant de 2 m, le stock augmenterait de 7,013 millions de m³. En effet, l'augmentation de 1 m permettrait à elle seule d'assurer le respect du volume écologique et de satisfaire et la demande en eau AEP et celle de la SAED.. Par ailleurs, un dispositif de suivi des eaux de drainage des SIPA de la SAED et autres aménagements villageois, est nécessaire.

Il en est de même de la sauvegarde des hippopotames qui jouent un rôle écologique très important pour le maintien du plan d'eau.

4. Bilan des résultats du modèle

4.1 Modèle conceptuel

Suivant les objectifs poursuivis par le modèle et les contraintes hydrogéologiques dues aux manques de données de base, le modèle conceptuel qui représenterait au mieux le fonctionnement du système est établi sur la base d'hypothèses simplificatrices qui sont :

- L'établissement d'une piézométrie conceptuelle qui basée sur un nombre limité de relevées piézométriques dans la zone avoisinante aux cours d'eau du Fleuve et de la Falémé – en effet, il ressort que l'écoulement se fait principalement de la nappe vers le cours d'eau dans la zone partant de Bakel à Kidira ; mais plus au Sud sur le long de la Falémé, l'écoulement de surface se fait vers la nappe. Cette piézométrie conceptuelle qui définie dans la zone avoisinante des cours d'eau n'a pas permis d'identifier une extension vers les limites naturelles qui semblent être au-delà de la zone à l'Est. Seule la limite Est qui est constituée du fleuve Sénégal et de la rivière Falémé représente une condition aux limites naturelles. Pour les besoins du modèle, nous avons repoussé les conditions aux limites Ouest jusqu'à la limite du bassin versant de telle sorte que l'imposition de conditions aux limites n'aurait pas une influence dans le domaine à modéliser.
- Des conditions de flux imposés (condition de Neuman) sont appliquées pour représenter les flux d'échange par recharge et pompage au niveau des ouvrages de captage ;
- Bien que l'étude géophysique ait identifié l'horizon fracturé comme étant aquifère, nous avons considéré que le système fonctionne en monocouche avec une connexion hydraulique entre les deux horizons. Cette hypothèse se justifie bien dans ce contexte puisque les niveaux statiques des ouvrages captant l'horizon fracturé varient suivant les saisons.
- Le calage du modèle se fera uniquement en régime hydraulique permanent du fait de l'absence des chroniques de mesures.
- Le maillage de 1km sur 1km a été adopté en rapport avec les objectifs du modèle simplifié dans les termes de référence.

Ainsi le modèle conceptuel retenu se présente comme suit :

- La prise en compte d'un système monocouche englobant les horizons alluvionnaires, de sables de couverture et de la couche fracturée du fait de l'absence de niveau franchement argileux et imperméable. Ce choix de système monocouche peut bien se justifier du fait que la continuité hydraulique semble être établie verticalement et le modèle circulation de la nappe d'une zone à une autre, montre bien une inter-connectivité des fractures. Il faut préciser que les sables alluvionnaires initialement ciblés par l'étude présente un intérêt médiocre du fait de leur extension géographique très limitée, de leur teneur élevée en argiles et de leur état de dénoyage ;
- Le mur du système serait ici représenté par le toit de la roche saine non fracturée ; il présente une morphologie très irrégulière suivant les zones, mettant ainsi en évidence les zones de fortes puissances et potentiellement favorables pour l'implantation des zones de captage ;
- Du fait de l'absence d'un niveau continu argileux s'intercalant entre les horizons, l'aquifère serait considéré comme libre, recevant une recharge directe par infiltration des eaux de pluies et des eaux usées. Le toit de l'aquifère est représenté par la topographie naturelle de la zone du projet ;
- Le choix d'un régime permanent à la date de septembre ne se justifie que par l'absence de chroniques de mesures dans la zone. Il faut signaler que les ouvrages qui étaient prévus pour la mesure continue des niveaux statiques sont en cours de réalisation dans la zone du projet. Ce qui fait que les données ne pourraient être utilisées dans le cadre de ce présent rapport. Toutefois, la variabilité saisonnière de niveaux statiques jusqu'à 4 m indique bien une bonne réactivité de la nappe du moins à certains endroits.
- L'extension géographique du modèle par la délimitation de la zone à modéliser ne répond pas toujours aux critères des conditions aux limites naturelles du système. En rapport avec

les objectifs d'implémentation d'un modèle simplifié, nous avons opté pour la prise en compte de l'ensemble du bassin versant intérieur depuis Bountou en passant par Kidira, Aroundou jusqu'à Bakel. Entre Bountou et Nahé, les rives droite et gauche de la Falémé peuvent être prises en compte dans la zone à modéliser. Par contre au-delà de Nahé jusqu'à Kidira, seule la rive gauche est intégrée dans la zone à modéliser.

- Les conditions aux limites qui seraient appliquées dans la zone à modéliser sont de type :
 - Condition « rivière » à charges variables le long des cours d'eau de la Falémé au fleuve Sénégal
 - Condition de flux nul sur les limites amont du bassin versant
 - Flux imposé représentant la recharge par infiltration des eaux de pluie et de la décharge par exploitation à partir des ouvrages
 - Une discrétisation de 1x1 km suivant un maillage régulier dans toute la zone à modéliser.

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

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

Les premiers tests de calage ont permis de réactualiser le modèle conceptuel en changeant la condition hypothétique de charge imposée à la limite Ouest comme une condition de flux nul et d'appliquer une condition « rivière » à la limite Est au niveau des cours d'eau. Cette dernière semble plus appropriée pour représenter les flux d'échange entre cours d'eau et nappe. Ces nouvelles conditions sont représentées dans la figure 3 ci-après.

Le choix de représenter la limite Ouest comme imperméable a été retenu pour se positionner dans des conditions pessimistes où l'apport aux cours d'eau ne serait pas uniquement du aux flux provenant de la condition de charge imposée mais juste par le flux de recharge qui arriverait aux cours d'eau.

Ainsi les cours d'eau sont pris en conditions « River » dont on renseigne la cote d'eau, la conductance, la largeur du lit, et la cote du fond du substratum de la rivière. Les valeurs de conductance doivent être élevées pour permettre un échange de flux entre le cours d'eau et la nappe. Pour les besoin du modèle nous avons pris une valeur moyenne de 4000 m² /j.

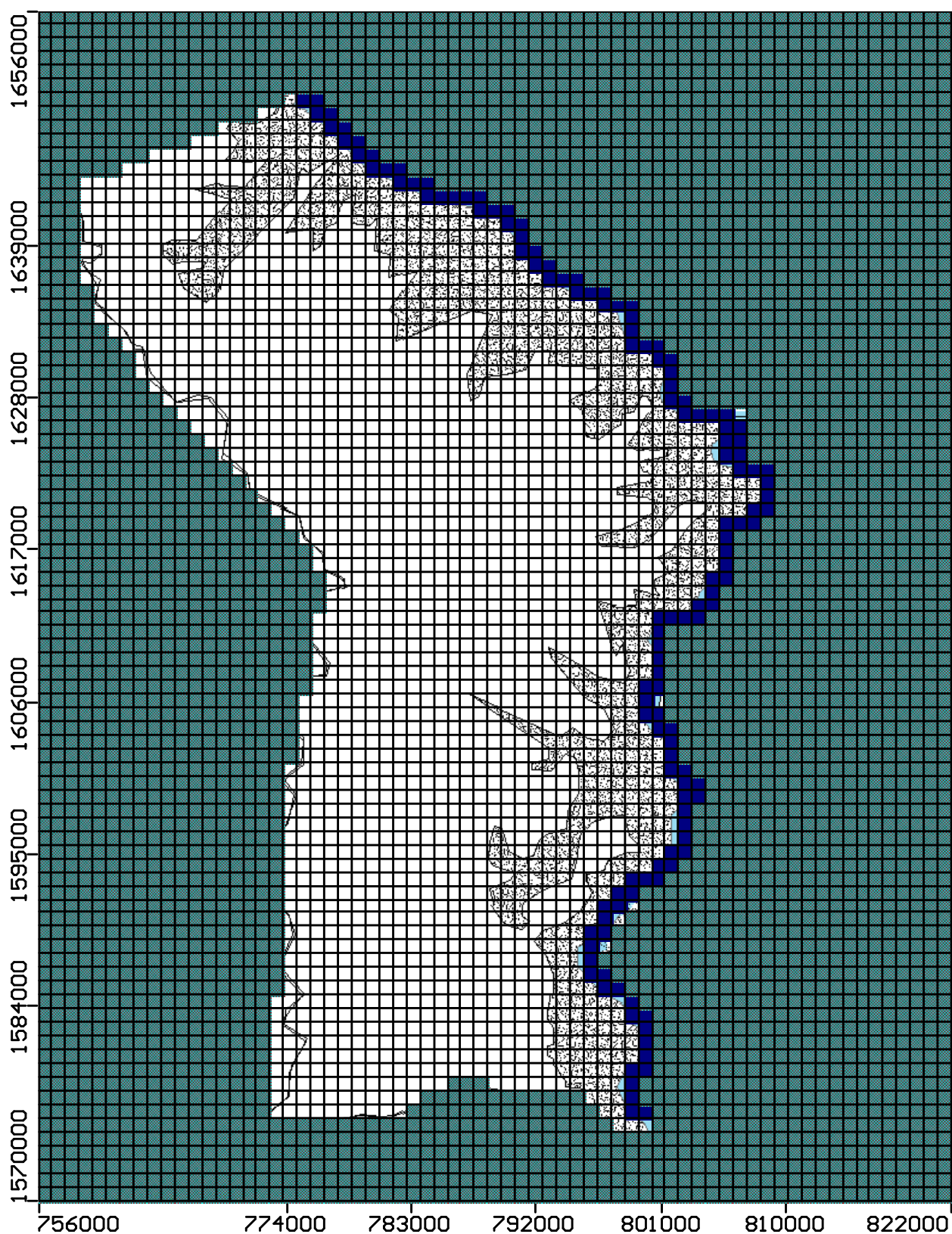


Figure 29: Modèle conceptuel retenu et discrétisation du domaine d'étude (les cellules de couleur blanche, verte et bleue représentent respectivement les cellules actives, inactives et les cellules de condition rivière)

4.2 Implémentation des données d'entrée du modèle

Ces données sont relatives aux paramètres suivants :

4.2.1 Débits prélevés

Les débits de pompage ont été évalués sur le terrain suite à des petites enquêtes sur les capacités de pompe et les durées de pompage. Il faut préciser que dans la région d'étude, trois types d'ouvrages servent pour l'alimentation en eau des populations locales :

- les puits traditionnels qui sont de faibles débits ;
- les petits forages à pompe manuelle les plus répandus dans la région ; ils ont été construits dans le cadre du programme UEMOA et les débits d'exploitation varient selon les tailles des populations de 5 à 10 m³/j ;
- les forages équipés de pompe et de château d'eau implémentés dans les gros villages avec des débits d'exploitation variant de 20 à plus de 50 m³/j pour la majeure partie des localités à l'exception des 2 forages de la ville de Kidira qui peuvent exploiter jusqu'à plus de 150 m³/j.

Ces données ont été implémentées dans le modèle en tenant compte de leur position géographique exacte.

4.2.2 Géométrie du toit et du mur

Les données numériques des courbes de niveau, des points cotés et des points nivelés obtenus respectivement à partir de la carte topographique de la région (source DTGC) et du nivellement mené dans le cadre de cette mission, ont permis de générer grâce au programme SURFER, une nouvelle distribution de la carte topographique basée sur le maillage de 1x1km de la zone à modéliser. La spatialisation a été menée par interpolation avec le module krigeage du programme Surfer qui permet une estimation plus fiable de la distribution du paramètre.

Par contre, le mur n'a été identifié qu'à partir des résultats des sondages électriques menés lors de la phase 2 du projet. Sa morphologie est très irrégulière du fait des profondeurs variées de l'horizon fracturé. Des coupes W-E montrent qu'aux alentours du cours d'eau, les épaisseurs sont très variables avec de brusques variations résultant de la profondeur de la fracturation (rapport 2).

Ces données numériques ont été implémentées au niveau de chaque maille du système en utilisant le programme SURFER et son module GRID qui est en fait une carte chiffrée.

Il faut noter que le système présente une géométrie très hétérogène avec des grandes variations d'épaisseurs. Ce sont les zones de grandes épaisseurs qui seront ciblées pour les nouveaux forages à simuler.

4.2.3 Paramètres hydrauliques

Les données de transmissivité issues de l'interprétation des pompages d'essai lors à la réception des ouvrages sont peu nombreuses. Elles varient de 0,02 à 6.10⁻⁵ m²/s. Du fait que le modèle ne prend en compte que des valeurs de perméabilité, les données de transmissivité ont été converties en perméabilité en les divisant par les longueurs des crépines des ouvrages. Ces valeurs de perméabilité sont de l'ordre de 10⁻⁴ à 10⁻⁶ avec une valeur moyenne de 3.10⁻⁴ m/s qui sera appliquée comme valeur de départ lors du calage. Toutefois, quelques ouvrages présentent de meilleures caractéristiques avec des valeurs qui peuvent atteindre 3.10⁻³ m/s.

4.2.4 Recharge

C'est l'un des paramètres les plus incertains mais également un des plus importants pour l'évaluation des potentiels de l'aquifère. Dans la région de socle, aucune investigation n'a été menée dans ce sens et les quelques données sur les niveaux statiques ne permettent pas une évaluation de la recharge bien que les quelques mesures de niveau statique entre Septembre et Décembre ont bien montré une remontée de nappe dans beaucoup d'ouvrages. Ainsi la démarche adaptée dans le cadre de ce travail est d'estimer avec une plus grande précision les champs des caractéristiques géométriques, de perméabilité et de débits d'exploitation et d'utiliser la recharge comme paramètre de calage du modèle, capable de restituer la piézométrie observée. Les valeurs moyennes variant de 10 à 15 mm/an nous semblent plus plausible comme champ d'infiltration

dans ce contexte et ces valeurs ont été capables de restituer une morphologie traduisant l'écoulement conceptuel et la relation nappe/cours d'eau dans la zone du projet.

4.2.5 Piézométrie de référence

Comme il a été signalé dans les précédents rapports, la zone de projet souffre d'un manque de données et surtout de fiabilité de mesures piézométriques. En effet, les ouvrages sont mal répartis dans l'espace et sont concentrés dans la majeure partie, le long des cours d'eau de la Falémé et du Sénégal. A cela, s'ajoute l'incertitude sur les données du fait que dans la majeure partie des puits, ce sont des niveaux dynamiques qui ont été mesurés. Toutefois, du fait des objectifs de construction de modèle simplifié, nous nous limitons à ces valeurs qui ne peuvent générer qu'une piézométrie conceptuelle.

En gros, le modèle qui est conçu vise plutôt à établir le régime d'écoulement et d'évaluer le bilan hydrique permettant d'établir les potentialités exploitables du système.

4.3. Calage hydrodynamique et analyse des résultats

Les hypothèses adoptées ont été déjà annoncées dans le rapport II du projet mais également dans le chapitre qui a précédé. Elles sont relatives à la prise en compte d'un système monocouche où les horizons sablo-argileux, altérites et fracturés sont globalisés en une seule couche. Dans la région, l'horizon alluvionnaire se présente suivant une couche d'extension très limitée à la lisière des cours d'eau et est le plus souvent dénoyé sur une grande partie. Il se présente sous les faciès sables grossiers gravillonnaires, argiles sableuses et des argilo-limoneux.

Les valeurs de transmissivité et de perméabilité qui sont de l'ordre de grandeur des caractéristiques hydrauliques des aquifères granulaires pourraient bien s'expliquer par le remplissage des fractures par des matériaux granulaires.

Le calage de départ de charge imposée au niveau des cours d'eau, a été modifié en utilisant les « conditions-rivières » qui sont indiquées pour ce type de régime d'écoulement de nappe. En effet, la relation rivière-cours d'eau/nappe se manifeste par des échanges de flux directs entre les deux systèmes et ces échanges sont conditionnés par la différence d'altitude entre le plan d'eau et la coté piézométrique de la nappe et également par la conductance du matériau constituant le lit du cours d'eau. Ce choix de substituer les conditions de charge imposée en « condition rivière », se justifie bien dans ce contexte où le niveau du plan du cours d'eau varie entre +24m dans la zone de Bountou à +13m à Bakel. Malheureusement, nous ne pouvons prendre dans le modèle la rive droite puisqu'elle se trouve en territoire malien et mauritanien et aucune donnée n'est disponible dans cette zone. Les paramètres géométriques, de pompage et même de distribution du champ de perméabilité ont été restitués au mieux lors de la phase d'implémentation et ceci pour permettre d'utiliser la recharge comme paramètre de calibration. Cette démarche nous a permis de reconsidérer la limite Est de la zone qui est considéré comme une limite hydraulique imperméable.

Ainsi donc sur la base de ces hypothèses, le modèle a été calibré en jouant plus sur les valeurs de recharge qui tournent autour de 10-15 mm/an, puis sur les valeurs du champ de perméabilité jusqu'à l'obtention d'une configuration piézométrique restituant l'écoulement du système.

Ces isopièzes générées par le modèle montrent bien un écoulement global de l'Ouest vers l'Est avec une vitesse maximale égale à $2,2 \cdot 10^{-6}$ m/s. Elles présentent un plus grand écartement à l'Ouest du secteur et un resserrement vers les cours d'eau où les valeurs sont 30, 25 et 20m (Figures 28 et 29). Cette morphologie traduit bien l'écoulement général du système et le calage est relativement correct avec une erreur moyenne de 1,8 m et la racine carrée de l'erreur moyenne de 2,7 m entre les valeurs mesurées et calculées par le modèle. La figure 9 présente une comparaison des niveaux piézométriques simulés et observés aux points de mesures de la campagne de Décembre 2014. L'ajustement est globalement bon pour ces points, avec quelques points où le niveau simulé est légèrement surestimé. Cet écart peut bien se justifier dans ce contexte où la presque totalité des mesures a été faite en régime de puisage dans les puits

villageois. Toutefois, le travail de calibration devrait se poursuivre en prenant en compte les 10 ouvrages nouvellement réalisés dans le cadre du projet qui devraient être nivelés et suivis.

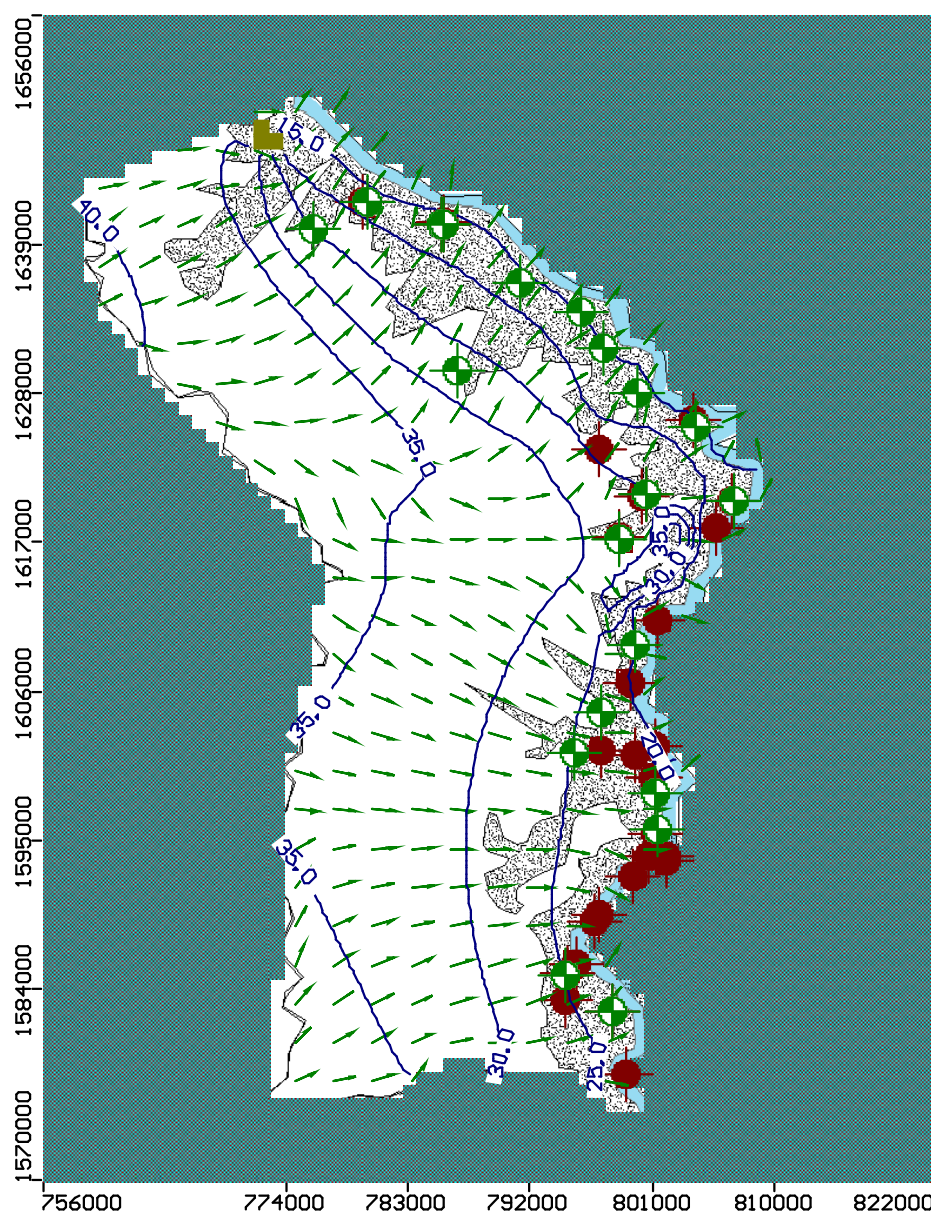


Figure 30: Carte piézométrique calculée par le modèle (isopièzes en ligne bleue et vecteur vitesse d'écoulement en flèche verte)

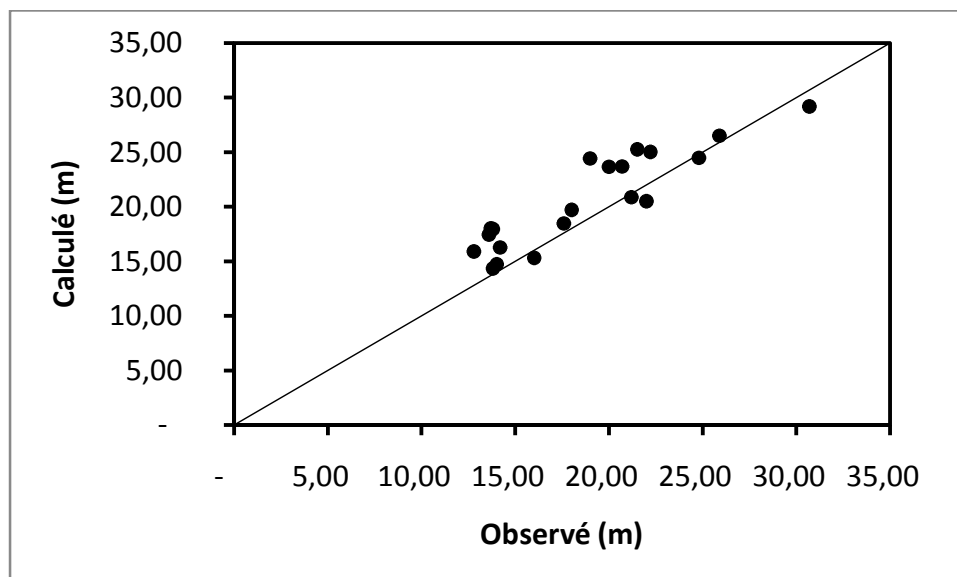


Figure 31: Comparaison entre données piézométriques mesurées et calculées

En termes de bilan hydrique, le tableau 12 ci-après présente les différents flux d'échange.

Tableau 11: Bilan hydrique calculé en m³/j

Paramètres	In	Out
Recharge	61132,4	0
Pompage	0	525
Echange avec cours d'eau	2430	63038

Il montre bien que la nappe est alimentée par les eaux de pluie et s'écoulent naturellement vers le cours d'eau. Il faut préciser que cet écoulement se fait surtout dans la partie Nord à partir de Kidira. Ces débits d'échange ne concernent que la rive droite et représentent environ 2% du débit moyen de la Falémé à Kidira en Décembre (30 m³/s). Le flux de 63.038 m³/j représente un potentiel exploitable non négligeable et donc constitue la cible pour la phase de simulation.

4.4. Exploitabilité – Potentialités

Un seul scénario a été retenu dans la phase d'exploitation du modèle. Il vise surtout à évaluer les potentiels exploitables dans les zones de grande épaisseur au niveau de Alahina, Kidira et dans les secteurs de Balou, Djimbé, Sébou et Sinthiou Dialiguel. Au total 9 forages ont été simulés pompant à des débits de 100m³/j. Le choix de 5 Forages pour la zone de Alahina et Kidira a été retenu pour suppléer la demande en eau de la ville de Kidira qui est en pleine expansion du fait de sa position stratégique. Pour les localités de Balou, Djimbé, Sébou et Sinthiou Dialiguel, nous avons opté pour l'implantation de nouveaux forages pouvant polariser les villages voisins.

La simulation a été effectuée en régime permanent dans des conditions pessimistes où les flux d'entrée dans le système sont constitués par la recharge – la limite Ouest étant prise comme une condition de flux nul.

Les résultats de simulation des 9 nouveaux forages en plus des pompages existants montrent que le potentiel exploitable est toujours faiblement sollicité. Les termes du bilan varient peu à l'exception des pompages qui passent de 525 à 1335 m³/j (Tableau 13). Les flux de sortie vers le cours d'eau est en fait une contribution de la nappe dans l'écoulement de surface qui est toutefois faible par rapport au débit mesuré aux stations de Kidira et Bakel. L'écoulement du système n'est presque pas affecté et les courbes isopièzes de même que les gradients hydrauliques ne changent presque pas (Figure 30)

Toutefois la qualité chimique et bactériologique pourrait être une contrainte majeure si l'on se réfère aux teneurs en nitrates mesurées et qui peuvent atteindre 1000 mg/l. Cet état de pollution peut bien se justifier au vu du caractère vulnérable du système induit par une porosité secondaire très élevée.

Tableau 12: Bilan hydrique après simulation

Paramètres	In	Out
Recharge	61105	0
Pompage	0	1335
Echange avec cours d'eau	2405	62355

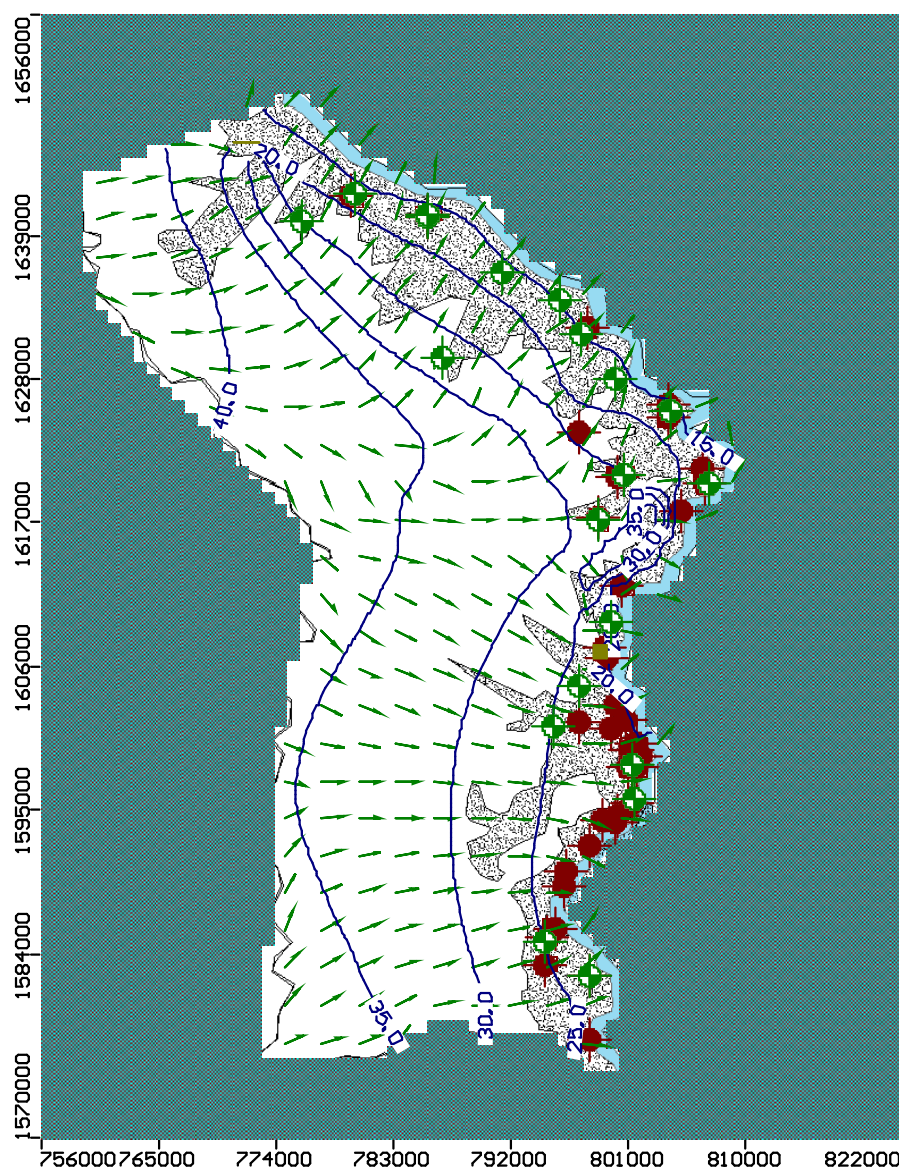


Figure 32: carte piézométrique après simulation (isopièzes en bleu et vecteur vitesse en vert)

4.5 Programme de suivi

Au vu de ces résultats, il s'avère nécessaire d'établir un protocole d'implantation et d'érection de périmètres de protection pour le bien être des populations locales. En effet, l'implantation de nouveaux forages doit tenir compte du choix définitif des sites par référence aux sources de pollution et ceci doit être accompagné d'un périmètre de protection. Egalement, il est préconisé d'opérer à des campagnes de mesure de la qualité chimique des ouvrages surtout dans les zones

de très fortes pollutions. Cette surveillance inclue aussi des actions de sensibilisation des populations sur les risques et sur les précautions à prendre avant utilisation.

5. Résultats préliminaires des nouveaux ouvrages

La réalisation de 10 nouveaux ouvrages devait accompagner le projet lors de la phase II pour permettre le suivi des niveaux statiques par l'installation d'appareils de mesures automatiques. Mais des contraintes techniques de démarrage et d'exécution avec l'entreprise KGR ont fait retarder la réception des ouvrages (à la fin de la mission) et leur suivi. Dans ce qui suit, nous allons juste faire une pré-analyse des données basée sur les rapports de réception des ouvrages. Le tableau ci-dessous présente les données des Procès verbaux de réceptions provisoires des ouvrages.

La foration pour l'ensemble des ouvrages s'est faite au battage jusqu'à des profondeurs dépassant légèrement l'horizon fracturé à l'exception des ouvrages de Kidira et Alahina où les investigations géophysiques ont révélé une forte puissance dans cette zone. Ce choix a été retenu pour installer la chambre de pompage et la pompe en bas des crépines dans la cas où les débits ne seraient pas importants. Les débits testés varient de 2 à 15 m³/h avec un rabattement variant de 5 à 24 m. Les débits les plus faibles sont enregistrés à Gounia (2m³/h) et Gourel 4.87 m³/h) par opposé à ceux de Kidira, Alahina et Sinthiou Dialiguel où les débits sont appréciables 13 à 15 m³/h pour de faibles rabattements (5-6m) et et des débits spécifiques supérieures à 2 m³/h/m. Dans ces localités, la capacités de la nappe permet des débits plus importants pouvant aller entre 20 et 30 m³/h si l'on tient compte de la puissance de l'aquifère qui est relativement élevée.

Tableau 13: Résultats des tests de pompes dans les nouveaux ouvrages

Localité	X_UTM	Y_UTM	Profondeur (m)	débit (m ³ /h)	Temps pompage (h)	Niveau statique (m)	rabattement (m)	cote pompe	Qs
Darou Salam	800750	1593848	41	11.62	8	10.33	13.1	29	0.88
Gangala (sans forage)	799735	1627855	42	15	8	9.3	19.18	41	0.78
Gounia	776124	1640245	42	2	8	8.20	24.03	33	0.08
Gourel Ari Khara	795419	1585879	41	4.87	8	13.10	13.05	31	0.37
Sinthiou Dialiguel	799722	1609066	35	13	8	12.5	5.80	34	2.24
Balou	797333	1630901	42	12	8	12.21	13.28	35	0.90
Kidira	800223	1600239	42	14	8	10.20	6.34	35	2.2
Nahe	801479	1595549	45	12	8	9.1	10.35	21	1.15
Alahina	794707	1585225	60	15	8	10.54	5.56	38	2.70
Sebou	805007	1625275	41	9	8	11.55	8.6	35	1.04

6. Conclusion générale et Recommandations

Cette synthèse de *"l' Etude hydrogéologique de la nappe des sables alluvionnaires entre Bakel et Kidira et Etude hydrologique de la Falémé dans la zone de Kidira"* effectuée dans le cadre du projet PEPEAM-IDA reprend les résultats acquis lors des investigations hydrogéologiques, hydrologiques et les résultats des nouveaux ouvrages réalisés. Elle a surtout permis d'améliorer nos connaissances sur les caractéristiques et le fonctionnement du système et plus particulièrement de la relation dynamique nappe/cours d'eau.

Un des premiers résultats est que les sables alluvionnaires initialement ciblés, dans le cadre du projet présente un intérêt hydrogéologique médiocre à l'exception de quelques poches situées à Kidira et vers Bakel. Ces formations sont plus souvent argileuses et dénoyées sur une bonne tranche - ce qui fait que les forages et même certains puits captent les formations fracturées et schistosées dont la puissance variable peut atteindre 95m dans certaines zones et renfermer un important potentiel. Toutefois dans le contexte de milieu de socle, la continuité hydraulique n'est pas toujours prouvée mais au vu des faibles niveaux statiques on peut valablement suspecter une circulation d'eau d'une zone à l'autre. Cette circulation plus ou moins rapide dépendrait de deux facteurs :

- Du remplissage par du matériau granulaire perméable (sables, schistes et argiles).
- De la configuration piézométrique même si elle est conceptuelle a permis de faire deux constats : dans la partie aval (Bakel-Ballou) de la zone du projet, l'écoulement vers les cours d'eau de la Falémé et du fleuve Sénégal, suggère une alimentation partielle des cours d'eau par la nappe ; par contre en amont depuis Bountou à Senedebou, les quelques mesures effectuées montrent une circulation inverse c'est-à-dire de la Falémé vers la nappe.

Cette dernière observation semble corroborer le fait que le régime de la Falémé devient sec sur une partie de l'année exception faite de la poche de Faboli qui se préserve du fait de la présence de bief.

L'analyse des débits d'écoulement de la Falémé (rapport 03) montre bien que les apports vers le cours se résument par les débits de crue et très faiblement par apport des nappes.

Du point de vue chimique, les eaux présentent un faciès généralement mixte bicarbonaté à l'exception d'une partie à eau saumâtre localisée à Yaféra. Les processus géochimiques qui contrôlent le chimisme de l'eau sont principalement l'hydrolyse des silicates, la dissolution des carbonates et les recharges de bases. Par contre il a été noté une très forte signature de pollution où 62% des ouvrages investigués présentent des teneurs en nitrates supérieures à la norme en dépassant parfois 1000mg/l. Cette pollution pourrait provenir soit des activités au droit des ouvrages, soit par transfert suivant l'écoulement du système qui est facilité par les fractures. Ces très fortes concentrations de nitrates qui reflètent le caractère très vulnérable de la nappe seraient accompagnées d'une dégradation microbiologique de l'eau, ce qui la rend impropre à la consommation. L'option d'alimenter les populations locales à partir de la poche de Faboli au vu de réserves potentielles se justifie très bien dans ce contexte où une précaution de traitement (chloration) est prise aussi bien pour les forages que les puits.

L'analyse de ses acquis a surtout permis de schématiser et de circonscrire le domaine à modéliser puis d'établir le modèle conceptuel de fonctionnement du système nappe/cours d'eau. Ce modèle sera surtout simplifié du fait de nombreuses incertitudes notées dans les données d'entrée.

Le fonctionnement hydrologique de la Falémé est rythmé par les apports pluviométriques dont la variabilité est dictée par la mousson ouest africaine. Les observations hydrométriques, commencées en 1903 par le suivi de la crue en saison des pluies à Kidira, ont été systématisées à partir 1951 au niveau des principales stations hydrométriques du bassin. Depuis lors, deux périodes à hydraulicité très différente ont été observées. De 1903 à 1967, le régime de la Falémé a été surabondant, soutenu par une pluviométrie régulière et excédentaire. La seconde période, de

1968 à 2012, est caractérisée par un déficit généralisé en Afrique de l'ouest. Durant cette période, le tarissement total de la Falémé est devenu une règle. La durée de cet assèchement total de la Falémé, en moyenne 78 jours, calqué sur la pluviométrie, notamment dans le haut bassin, exerce une forte contrainte sur toutes activités économiques le long de la Falémé.

La poche pérenne de Faboli et son plan d'eau constituent alors la seule réserve en eau pérenne le long de la Falémé. L'étude bathymétrique a fourni ses caractéristiques morphométriques et montré la complexité du remplissage de la poche de Faboli. En effet, le rythme de la pluviométrie dans le haut bassin et notamment la persistance de jours sans pluie, peut entraîner la déconnexion de la poche du cours amont et aval de la Falémé comme le montre le rapport.

L'étude par modèle a révélé que le potentiel exploitable évalué dans les conditions d'hypothèses pessimistes est relativement énorme par référence au bilan fourni où plus de 60.000 m³/j s'écoule vers le cours d'eau mais également par rapport aux besoins en AEP de la zone du projet. Mais la qualité chimique et bactériologique demeure une contrainte majeure pour bon nombre d'ouvrages où des taux de nitrates très élevés ont été mesurés— ce qui constitue un frein pour leur utilisation comme eau de boisson. Un choix de sites d'implantation et d'érection de périmètres de protection autour des ouvrages s'avère nécessaire lors de la phase de mobilisation de cette ressource. Mais au vu des tendances de développement de la zone avec les aménagements hydro-agricoles et les possibles impacts par l'utilisation de pesticides, d'engrais et par les eaux de drainage, les risques de pollution sont aggravés du moins au niveau de certaines zones. La réserve de la poche de Faboli, serait un atout surtout dans la zone Sud où le potentiel de l'aquifère est faible comparé à la zone au-delà de Kidira

7. Références bibliographiques

- Brunet-Moret Y. (1960). Méthode d'analyse de la répartition des précipitations dans le temps et dans l'espace. AISH Pub. N° 53, pages 268-277. .
- Brunet-Moret Y. (1969). Etude de quelques lois statistiques utilisées en "hydrologie". Cah. O.R.S.T.O.M. sér. Hydrol., Vol. VI, N° 3, 3-99.
- Brunet-Moret Y. (1971). Eléments de base pour la critique à vue des données pluviométriques. Rapport ORSTOM, Paris 3 pages (http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/b_fdi_04-05/05160.pdf).
- Brunet-Moret Y. (1979). Homogénéisation des précipitations. Cah. ORSTOM, sér. Hydrol., Vol. XVI, N° 3 et 4, pp. 147-170.
- Brunet-Moret Y. (1980). Retour sur l'homogénéisation des pluies annuelles par vecteur régional. *Météorologie, VI^è série, n°s 20-21* 61-65.
- Hiez G. (1986). *Bases théoriques du "vecteur régional". Les premières applications et leur mise en œuvre informatique. "Propos recueillis par B. Pouyaud"*. Communication présentée à Deuxièmes journées hydrologiques de l'ORSTOM à Montpellier : 1-35.
- Olivry J. C. (1983). "Le point en 1982 sur l'évolution de la sécheresse en Sénégal et aux îles du Cap Vert : examen de quelques séries de longues durées (débits et précipitations)." Cah. ORSTOM - sér. Hydrologie Vol XX n°1 Paris.
- Rochette C. (1974). Le bassin du fleuve Sénégal. Monographie hydrologique ORSTOM N°1. Paris: 450 pages.
- Vauchel Ph. (2004). *Hydraccess : Gestion et traitements de données hydrologiques sous Office 2000*. Montpellier: IRD.
- Théveniaut, H., Duvail, C., Ndiaye, P.M., Fullgraf, T., Delor, C., Goujou, J.C., Buscail, F., et Diagne, E., 2010a.** Carte géologique à 1/500 000 du Sénégal, feuille SUD-EST. Ministère des Mines, de l'Industrie, de l'Agro-Industrie et des PME, Direction des Mines et de la Géologie, Dakar.
- Théveniaut, H., Ndiaye, P.M., Buscail, F., Couëffé, R., Delor, C., Fullgraf, T. et Goujou, J.C., 2010b.** Notice explicative de la carte géologique à 1/500 000 du Sénégal oriental. Ministère des Mines, de l'Industrie, de l'Agro-Industrie et des PME, Direction des Mines et de la Géologie, Dakar.
- Wuilleumier, A., Mall, I. et Ndiaye, P.M., 2010a.** Carte hydrogéologique à 1/500 000 du Sénégal oriental. Ministère des Mines, de l'Industrie, de l'Agro-Industrie et des PME, Direction des Mines et de la Géologie, Dakar.
- Wuilleumier, A., Théveniaut, H., Mall, I. et Ndiaye, P.M., 2010b.** Notice explicative de la carte hydrogéologique à 1/500 000 du Sénégal oriental. Ministère des Mines, de l'Industrie, de l'Agro-Industrie et des PME, Direction des Mines et de la Géologie, Dakar.