



UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP DE DAKAR

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES

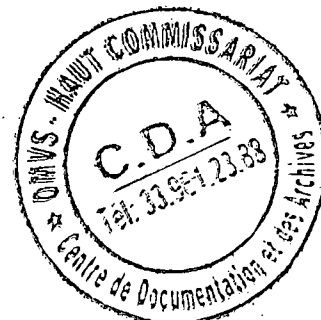
DEPARTEMENT DE GEOLOGIE



Mémoire de Master de Géosciences

Option : Hydrogéologie

N° d'ordre : 184



Potentialités et caractéristiques de la nappe alluviale dans la vallée du fleuve Sénégal : Exemple du Département de Bakel

Présenté par : Kadidiatou NDIAYE

Sous la Direction de : Monsieur Moustapha DIENE

Soutenu le 12 janvier 2016

Devant la commission d'examen composée de :

NOM	Prénom	Qualité	Organisme
MALOU	Raymond	Président	UCAD
CISSE-FAYE	Seynabou	Membre	UCAD
DIENE	Moustapha	Membre	UCAD
ATTAHER	Ag Mohamed	Invité	



DEDICACES

Je dédie ce travail :

A mes parents El hadji Malick Ndiaye et Marie Louise Diouf

En signe de reconnaissance de toute l'aide que vous m'avez apportée concernant mon éducation et mes études qui aboutissent aujourd'hui à la réalisation de cette étude. Recevez à travers ce travail, toute ma gratitude et mes profonds sentiments.

A mon grand frère Ahmadou Ndiaye.

Je vis avec toi depuis 2004, tu m'as soutenu et protégé durant toutes ces années. Tu étais toujours présent quand j'avais besoin de toi. Je n'aurais pu achever ce travail sans ta générosité et ton affection. Les mots ne suffisent pas pour exprimer l'attachement et l'affection que j'ai pour toi.

A toutes les personnes qui m'ont soutenue pour la réussite de ce document.

REMERCIEMENTS

Je remercie d'abord le tout puissant de m'avoir donné la vie, la santé, et le courage de pouvoir continuer mes études.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont apportées leur soutien pour la réussite de ce document.

Mr Raymond Malou, Maître de conférences au département de géologie de l'Université Cheikh Anta Diop, chef du département et responsable du master d'hydrogéologie. Je tiens à vous remercier de nous avoir formés en hydrologie, vous avez été plus qu'un père pour nous lors des camps de terrain, par votre esprit d'éducateur vous nous avez encouragés et redonnés de la confiance pour poursuivre nos études. Je vous remercie aussi d'avoir accepté de présider mon jury.

Mr Moustapha Diène, Maître-assistant au département de géologie de l'Université Cheikh Anta Diop. Vous m'avez aidée à trouver un stage, et vous avez accepté de devenir mon maître encadreur. Vous êtes resté très ouvert et très accessible à mon égard. Vous m'avez accordé votre temps et suivi de près mon document, vous avez aussi été très patient avec moi. Je vous remercie vivement pour cet aide précieuse et aussi d'avoir accepté d'être présent pour la présentation de ce document.

Madame Nabou Cissé Faye, Maître Conférencier au département de géologie de l'Université Cheikh Anta Diop. Je vous remercie vivement d'avoir accepté d'être présent à ma soutenance.

Mr Attaher Ag Mohamed, nouveau Chef de Division Protection de l'Environnement et du Suivi Evaluation à l'OMVS, votre disponibilité et vos conseils m'ont beaucoup aidée. Je vous remercie vivement de votre soutien et d'avoir accepté d'être présent à ma soutenance.

Mr Oumar M. Touré, ex Chef de Division Protection de l'Environnement et du Suivi Evaluation à l'OMVS. Vous avez été très ouvert et très disponible avec moi durant le peu de temps que j'ai eu à passer avec vous. Vous m'avez soutenue et encouragée à aller de l'avant.

Mr Amadou Lamine Ndiaye, directeur de la Direction de l'Environnement et du Développement Durable, qui m'a acceptée au sein de cet organisme, et m'a apportée son soutien moral et financier.

Mr Moussa Sow, responsable du laboratoire d'hydrochimie de l'Université Cheikh Anta diop, vous m'avez beaucoup aidée pour l'analyse de mes échantillons.

Mr Ibrahima Mall, doctorant à l'Université Cheikh Anta, de même vous m'avez surtout aidée à mieux comprendre le logiciel d'ARC GIS.

A la famille Cissokho de Bakel, Nafi Faye, Mamadou Cissokho et Ousseynou Cissokho, qui grâce à leur frère Assane Cissoko, m'ont accueillie à bras ouvert lors de mon camp de terrain. A Seydou Diarra, qui a été mon guide.

A ma belle-sœur Ndeye Diouldé Dia, mes neveux El hadj Malick Ndiaye et Pathé Massaer Ndiaye ainsi que mes nièces Rokhayatou Ndiaye, Ndeye Khady Ndiaye et Adjia Maguette Ndiaye.

A mes frères et sœurs, Ousmane Ndiaye, Moussa Diouf, Ndeye Dethié Ndiaye, Baïlo camara, Fatimatou Bintou Ndiaye, Maïmouna Diouf, Madeleine Diouf et Oumou Diouf. A ma tante Awa Diouf qui a été plus qu'une mère pour moi.

A ma meilleure amie Fatou Diallo et sa famille, à mes amis Seydina Oumar Diop, Oumar Faye.

A toute la famille Dieng et Dia de Gueule Tapée, plus particulièrement à Amadou Martin Dieng (dit Papa Doudou), tata Fatou Dia, Ndeye Maguette Dieng, Adjia Maguette Dia Mame Maty Dieng et Adjia Maguette Dieng.

A monsieur Mamadou Fall de la Direction de la Gestion et de la Planification des ressources en Eau, ainsi qu'à tout son personnel.

A monsieur Babacar Diop et monsieur Moustapha Faye qui m'accueillait tout le temps dans leur bureau pour que je puisse travailler dans le calme.

Edgar Terence Benam, Yaya Samba Dem, Françoise Barrela, Mamadou Harona Ba.

A tous les stagiaires de la salle Diama, Abdoulaye Faty, Adjia Coura Gueye, Armel Tefack.

A toutes mes colocataires de la cité Aline Sitoé Diatta (Claudel), plus particulièrement à Diarra Thiaw.

TABLE DES MATIERES

LISTE DES SIGLES.....	8
LISTE DES ANNEXES	48
RESUME	9
INTRODUCTION	1
PRESENTATION DE L'OMVS.....	2
CHAPITRE I: PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	4
I. CADRE GEOGRAPHIQUE	4
I.1. Localisation de la zone d'étude.....	4
I.2. Géographie physique de la zone.....	6
I.2.1. Géomorphologie	6
I.2.2. Hydrologie	6
I.2.3. Sol et végétation	7
I.3. Hydroclimatologie de la zone.....	7
I.3.1. Climatologie	7
I.3.2. L'évapotranspiration.....	8
I.4. Aspect socio-économique.....	9
II. CADRE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE	10
II.1. Cadre géologique.....	10
II.2. Cadre hydrogéologique	12
II.2.1. Les différentes nappes et leur mode d'alimentation.....	12
II.2.2. Relation aquifères / fleuve et inter-nappes.....	14
II.2.3. Nature hydrochimique des différentes nappes de la zone	15
CHAPITRE II: CARACTERISTIQUES ET POTENTIALITES DE LA NAPPE ALLUVIALE DE BAKEL.....	16

I. METHODOLOGIE	16
I.1. Les matériels de mesure	17
I.2. Méthodologie de mesure	17
I.3. Les outils de traitement des données	18
I.3. Représentation géographique des données	18
II. POTENTIALITE DE LA NAPPE ALLUVIALE.....	20
II. 1. Nature du réservoir aquifère.....	20
II.1. 1. Lithologie de l'aquifère	20
II. 1. 2. La profondeur de la nappe dans la zone	23
II. PARAMETRES CARACTERISTIQUES DE L'AQUIFERE	24
III. LES SOURCES D'APPROVISIONNEMENT EN EAU DE LA ZONE	26
III.1. Les eaux de surface	26
III.2. les eaux souterraines	26
IV. COMPOSITION HYDROCHIMIQUE DE LA NAPPE	28
IV. 1. Vulnérabilité des nappes alluviales	28
IV.1. 1. Définition de la norme de qualité pour l'eau potable	28
IV.1.2. Sources de pollution de la zone	29
IV.1.3. Pollution par les eaux usées et les ordures ménagères	29
IV.1.4. Pollution par l'agriculture.....	30
V. PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES	31
V.1. La balance ionique	31
V.2. Le pH.....	32
V.3. La conductivité.....	32
V.4. Faciès chimiques des eaux	32
V.4.1. Composition anionique des eaux	33
V.4.2. Composition cationique des eaux	34

V.5. Les paramètres chimiques.....	34
V.5.1. Le sodium.....	34
V.5.2. Le chlorure	35
V.5.3. Le bicarbonate.....	36
V.5.4. Le calcium.....	37
V.5.5. le Magnésium.....	38
V.5.6. Le sulfate.....	39
V.4.7. Le potassium	40
V.4. 7. Les nitrates	41
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	43
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	45
ANNEXE I : DONNEES HYDROCLIMATIQUES DE LA STATION DE BAKEL	48
ANNEXE II : DONNEES PHYSICO-CHIMIQUE DE LA ZONE.....	49

LISTES DES FIGURES

Figure 1 : l'organigramme de l'OMVS.....	3
Figure 2 : découpage de la vallée du fleuve Sénégal	4
Figure 3 : carte de localisation du département de Bakel	5
Figure 4 : Pluviométrie mensuelle de la station de Bakel en 2007(source OMVS).....	8
Figure 5 : Evaporation bac de la station de Bakel de l'année 2014 (source : station météorologique de Bakel)	9
Figure 6 : Carte géologique de l'Afrique de l'Ouest (Dallmeyer, Lécorché ,1991 <i>in</i> Rocci, 2012).....	11
Figure 7 : carte de la représentation des différents points d'eau observés.....	19
Figure 8 : L'eau souterraine dans les dépôts alluviaux de rivière (d'après MacDonald, 2005)	20
Figure 9 a : coupe lithologique des forages captant la nappe alluviale.....	21
Figure 9a : Coupe lithologique captant les nappes bicouches (Socle/nappe alluviale).....	22
Figure 10 : Représentation en Diagramme de Piper des différents points échantillonnés...	33
Figure 11 : Histogramme des ions majeurs en mg/l.....	34
Figure 12 : Histogramme des concentrations en sodium	35
Figure 13 : Histogramme des concentrations en chlorure.....	36
Fig. 14 : histogramme des concentrations en bicarbonate	37
Figure 15 : Histogramme des concentrations en calcium	38
Figure 16 : Histogramme des concentrations en magnésium.....	39
Figure 18 : Histogramme des concentrations en potassium.....	41
Figure 19 : Histogramme des concentrations en nitrate.....	42

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Cumul des moyennes pluviométriques par décennie de la station de Bakel (période de 1952 à 2001, source : OMVS).....	8
Tableau 2 : niveau statique des différents forages.....	23
Tableau 3 : Valeurs de transmissivité des différents forages captant la zone.	24
Tableau 4 : valeurs de conductivité des différents forages captant la zone.....	25
Tableau 5 : valeur théorique du coefficient d’emmagasinement (Domenico (1972) and Mercer et al, (1982)).....	26
Tableau 6 : les forages localisés dans la zone d’étude et leur débit d’exploitation.	27

LISTE DES SIGLES

ASUFOR : Association des Usagers du Forage.

BRGM : Bureau de Recherche Géologique et Minière.

DGPRES : Direction de la Gestion et de la Planification de Ressources en Eau.

IRD : Institut de Recherche et de Développement.

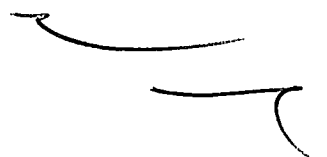
OMS : Organisation Mondiale de la Santé.

OMVS : Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Sénégal.

SAED : Société Nationale d'Aménagement et d'Exploitation des terres du Delta et de la vallée du Fleuve Sénégal.

SDE : Sénégalaise des Eaux

AEP : Adduction d'Eau Potable



RESUME

Situé dans l'extrême Est du Sénégal, dans la région de Tambacounda, le département de Bakel appartient au domaine sahélien. Il est compris entre les coordonnées 14°54' Nord et 12°28' Ouest. Dans cette zone, les eaux souterraines sont contenues soit dans les formations fissurées du socle soit dans les formations alluviales déposées tout au long de la vallée du fleuve Sénégal.

L'objectif de cette étude consiste à améliorer la connaissance du fonctionnement hydrogéologique et hydrochimique de la nappe alluviale du département de Bakel, pour une meilleure gestion.

La nappe alluviale dans le département de Bakel est contenue dans des alluvions grossières hétérogènes constituées de sables à sable argileux, intercalés de quartz et de pisolithes de fer. La transmissivité de la nappe est assez bonne et elle est comprise entre 10^{-2} et 10^{-3} m²/s. Les valeurs de perméabilité sont faibles à moyennes et sont de l'ordre 10^{-3} à 10^{-4} m/s. Les débits d'exploitation sont importants et varient de 40 à 71 m³/h. Les profondeurs de l'eau par rapport au sol peuvent atteindre une moyenne de 10,5 m au niveau des puits et jusqu'à 25 m au niveau des forages.

L'analyse hydrochimique montre que la minéralisation des eaux de l'aquifère est faible à moyenne avec des valeurs de conductivités variant de 47,2 à 957 µS/cm. Les eaux de cette nappe présentent un faciès à dominance bicarbonaté mixte, et par endroit un faciès nitraté mixte et un faciès bicarbonaté sodique. Le pH du milieu est légèrement acide à neutre, il varie entre 6,55 à 7,5. Une pollution ponctuelle par les nitrates, souvent d'origine anthropique a été mise en évidence dans la zone.

Mots clefs : Vallée, alluvions, hydrochimie, faciès, paramètres hydrodynamiques.

INTRODUCTION

Le Sénégal comme tous les pays situés dans les zones arides et semi-arides, est confronté à de nombreux problèmes liés à l'accessibilité à l'eau potable. L'irrégularité des pluies et les fortes températures qui s'accroissent de plus en plus à cause des changements climatiques font tarir de manière précoce les eaux de surface et réduisent considérablement les niveaux des nappes superficielles. L'accès à l'eau potable et à l'assainissement sont deux conditions essentielles à l'atteinte des Objectifs du Millénaire pour le Développement au Sénégal. Bien qu'une partie de ces objectifs soit atteinte, certaines localités souffrent toujours du manque d'eau.

Le fleuve Sénégal a façonné une large vallée qui s'étend de Bakel jusqu'à Dagana. Cette vallée est trop sollicitée aussi bien dans le domaine de l'adduction d'eau potable que dans celui des aménagements hydro-agricoles.

La nappe alluviale circule dans les sédiments d'âge quaternaire déposés tout au long de la vallée. Elle est très sollicitée du fait de leur accessibilité, de leur bonne qualité (à l'état naturel), en plus elle soutient le débit de base des cours d'eau en période d'étiage. Selon (Margal, 1997), les nappes alluviales sont des nappes d'accompagnement c'est-à-dire nappe ou partie de nappe sous-terraines qui sont en forte liaison hydraulique avec un cours d'eau permanent et dont l'exploitation peut avoir un effet préjudiciable sur le débit d'étiage superficiel. Ce préjudice consiste soit en une réduction de l'apport de la nappe au cours d'eau, soit en une réalimentation induite de la nappe par le cours d'eau. Vu l'importance de cette nappe, très peu d'études ont été menées dans la zone de Bakel. Pour pouvoir faire une gestion efficace des ressources en eau dans la zone, il s'avère nécessaire de réaliser une synthèse de données permettant une meilleure connaissance de l'aquifère du milieu. Sur ce contexte, avec la collaboration de l'Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Sénégal une campagne de terrain a été réalisée dans le département de Bakel. Ce présent mémoire est réparti en deux chapitres:

Dans le premier chapitre nous allons présenter la zone d'étude, décrire son cadre physique, géologique et hydrogéologique.

Le chapitre II concernera la méthodologie adoptée pour comprendre le fonctionnement de la nappe, ainsi que l'étude des potentialités et des caractéristiques de la nappe.

PRESENTATION DE L'OMVS

En réalité, dès le 19^{ème} siècle, diverses initiatives sont entreprises en vue de la mise en valeur du fleuve Sénégal parmi lesquelles, la publication du plan de colonisation agricole en 1985 jusqu'aux Etudes Sectorielles et Aménagement de la base vallée et du Delta par la Mission d'Aménagements du fleuve Sénégal (MAEF). Avec les indépendances, le processus institutionnel s'accélère avec la mise en place de:

- La Convention Internationale du 26 Juillet 1963 relative à l'Aménagement Général du Bassin du fleuve Sénégal ;
- La convention Internationale du 6 février 1964 relative au statut du Fleuve Sénégal ;
- Le statut général de l'Organisation des Etats Riverains du Sénégal approuvé à LABE (Guinée) le 24 Mars 1968 et amendé à Conakry le 3 février 1970 par la conférence des chefs d'Etat et du Gouvernement de l'OERS.

En mars 1972, ultime cadre institutionnel, l'OMVS voit le jour. Sa création intervient dans le contexte de graves péjorations climatiques, marquée par une sécheresse persistante et sévère qui dévaste toute la vallée du fleuve. A cela s'ajoute la remontée de la langue salée sur près de 250 km rendant les terres impropres à la culture. Le Mali, la Mauritanie, et le Sénégal décident alors d'unir leurs efforts pour maîtriser la disponibilité de l'eau et chercher les moyens d'une exploitation rationnelle et coordonnée des ressources du bassin.

Pour atteindre ses objectifs l'OMVS a défini un programme d'infrastructure dont les plus importants sont:

- La réalisation du barrage antisel de Diama la partie Sénégalaise à l'aval du fleuve vers St Louis en Aout 1986.
- La réalisation du barrage hydroélectrique de Manantali dans la partie guinéenne en Mars 1988.

Après plusieurs années de fonctionnement, la Guinée a rejoint l'organisation en 2006.

L'OMVS est placée sous la haute tutelle de la conférence des Chefs d'Etat et du Gouvernement, qui définit la politique de coopération et de développement de l'organisation. La présidence de la Conférence est assurée à tour de rôle et pour un mandat de deux ans.

Outre de la conférence, l'Organisation compte 5 organes permanents qui sont :

- Le conseil des ministres qui élabore la politique générale d'aménagement du bassin pour la mise en valeur de ses ressources ;
- Le haut-commissariat qui applique les décisions du conseil des ministres ;
- La société de Gestion de l'Energie de Manantali (SOGEM) ;
- La Société de Gestion de d'Exploitation du Barrage de Diama ;
- La Société de Gestion et d'Exploitation de la Navigation.

L'organigramme du Haut-commissariat est présenté comme suit (fig. :1).

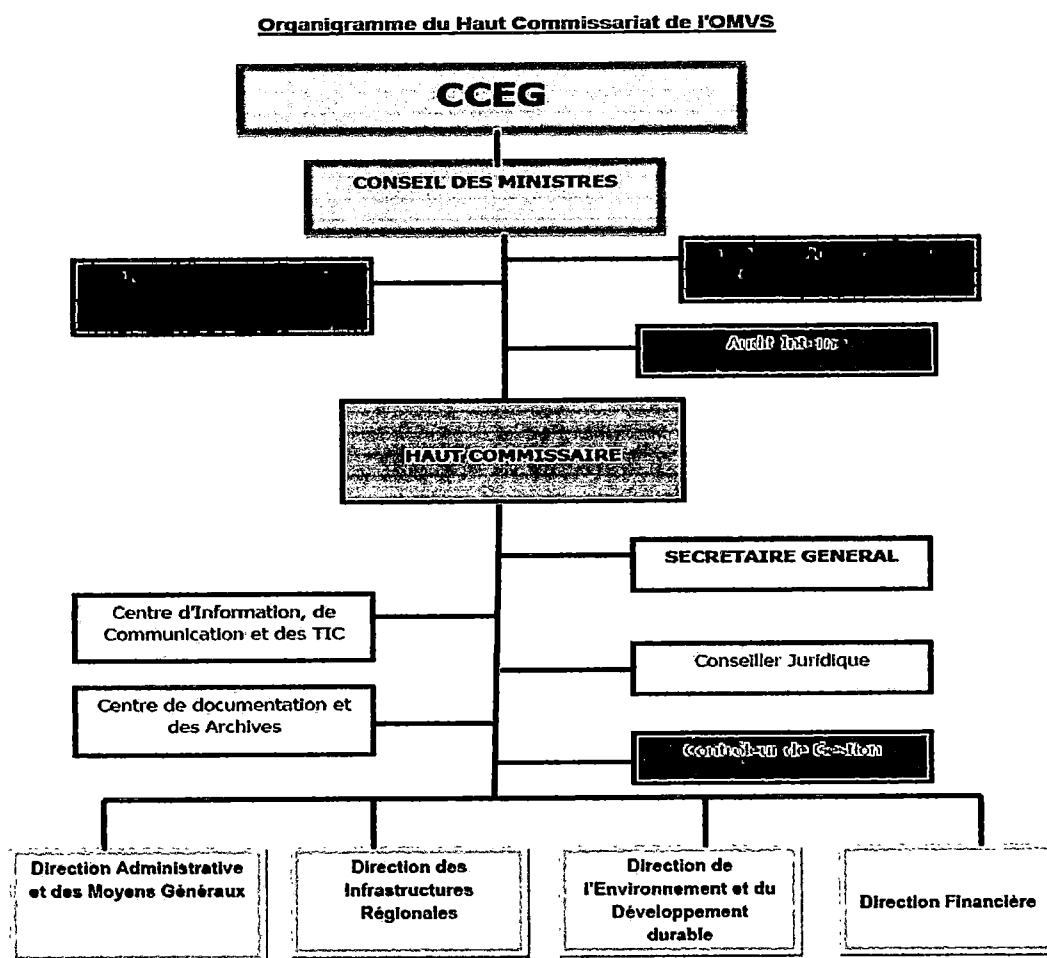


Figure 1 : l'organigramme de l'OMVS

CHAPITRE I: PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

I. CADRE GEOGRAPHIQUE

I.1. Localisation de la zone d'étude

Le fleuve Sénégal prend sa source en République Guinée, il est formé par la réunion de deux cours d'eau notamment le Bafing et le Bakoy, dont la confluence se fait près de Bafoulabé au Mali. Il s'étend sur une superficie de l'ordre de 289 000 km² répartie entre la Guinée (31 000 km²), le Mali (15 500 km²), la Mauritanie (75 000 km²) et le Sénégal (31 000 km²), (Sambou, 2004). Après avoir traversé la partie occidentale du Mali, il constitue sur le reste de son parcours, la frontière entre les territoires du Sénégal et de la Mauritanie. Sur la rive droite, les principaux affluents du fleuve Sénégal sont la Komlobiné, le Karakoro et le Gorgol. Sur la rive gauche, la Falémé constitue le plus important affluent, elle est longue de 650 km et prend sa source dans la partie nord du Fouta Djallon. Elle se jette dans le fleuve Sénégal à 30 km en amont de Bakel (fig.2).

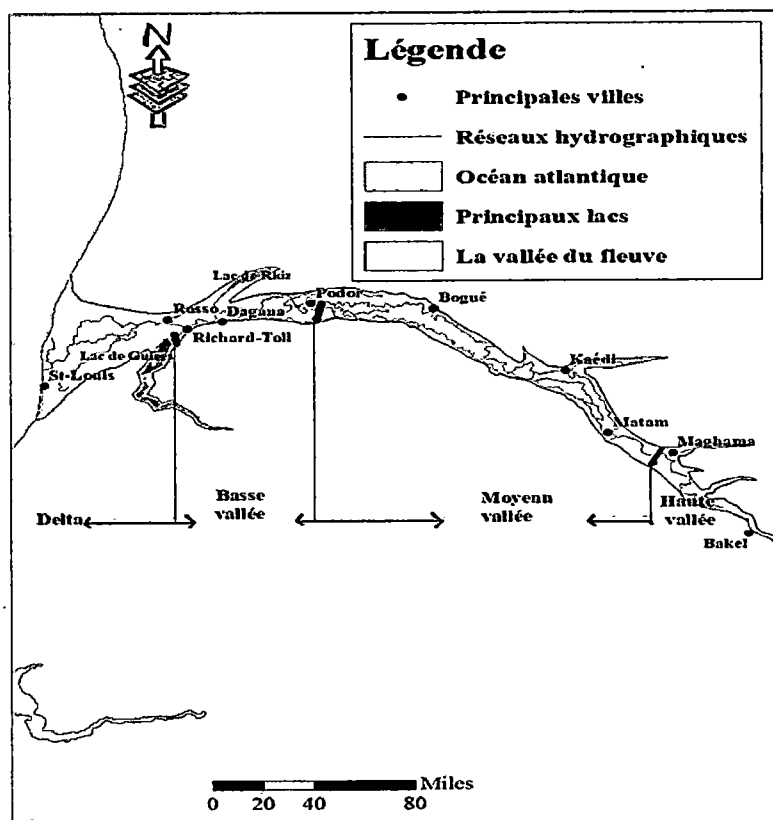


Figure 2 : découpage de la vallée du fleuve Sénégal

Notre domaine d'étude couvre la vallée du fleuve Sénégal plus précisément la zone de Bakel. La vallée du fleuve Sénégal est une des grandes vallées alluviales de l'Afrique occidentale (Michel, 1984). Elle s'étend dans le territoire sénégalais de Bakel à Dagana et constitue une zone d'inondation dont la largeur varie de 10 et 25 km. Bakel se situe dans la partie Orientale du Sénégal dans de la région de Tambacounda (fig. 3). Il appartient au domaine sahélien compris entre les coordonnées 14°54' Nord et 12°28' Ouest.

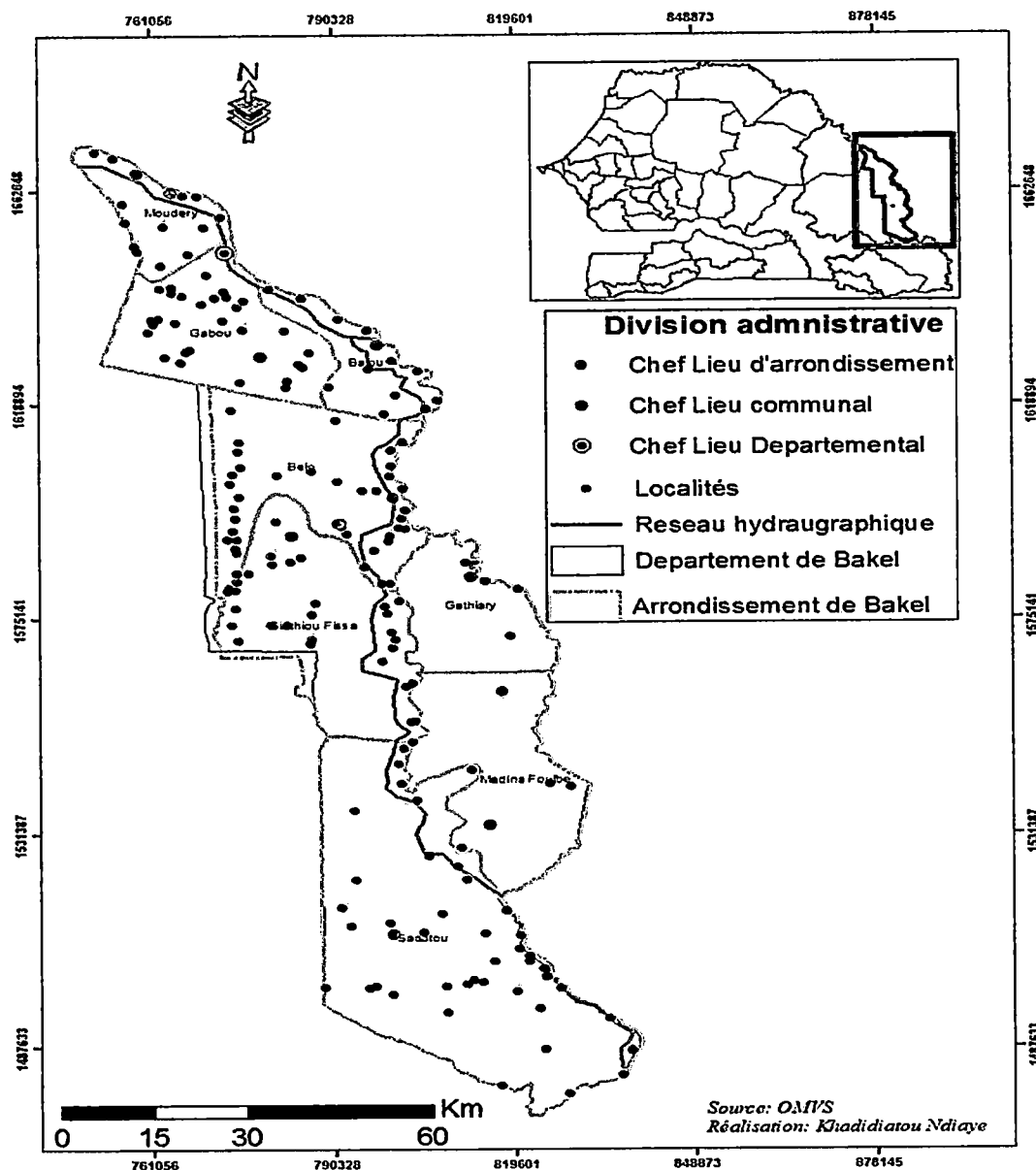


Figure 3 : carte de localisation du département de Bakel

I.2. Géographie physique de la zone

I.2.1. Géomorphologie

La vallée du fleuve Sénégal a été creusée pendant le Quaternaire ancien et moyen dans les sédiments tendres, par étapes successives dont témoignent les restes des terrasses graveleuses (Michel, 1984). Elle présente de nombreux méandres, avec une pente générale faible de 0.02%. La vallée du fleuve Sénégal se distingue par un relief plat, mais parfois on y trouve de petites dunes et de butes dans la partie non inondable de Diéri et un relief plus haut non inondable, le Walo appelé aussi le Hollaldé.

La géomorphologie dans la partie orientale du Sénégal est beaucoup plus marquée que celle du reste du pays. C'est dans ce secteur que se situe le point le plus culminant du pays à 581 m d'altitude (Mt Sambagalou) (Wuilleumier et al, 2010). La zone d'étude est érigée sur une plaine alluviale assez uniforme cernée par un système de collines rocheuses et entourée par une ceinture de dépressions inondables. Ces zones alluvionnaires à sol compact sont le siège principal du ruissellement.

I.2.2. Hydrologie

Le fleuve Sénégal présente un tracé d'une longueur de 1 800 km. En aval de Bakel, il traverse un vaste bassin sédimentaire qu'il entaille en une grande vallée alluviale dont la longueur varie de 10 à 25 km. Le fleuve décrit un arc de cercle qui s'étire sur 430 km jusqu'à Richard Toll, avant de traverser la région plate du Delta. Bakel reçoit la Falémé qui est l'affluent le plus important du fleuve Sénégal. La Falémé est un cours d'eau bien alimenté en moyenne mais extrêmement irrégulier. Le débit moyen mensuel observé en période d'étiage n'atteint que 0,5 m³, comparé au mois de Septembre où il peut atteindre 750 m³. De bakel jusqu'à Moudéri en passant par Diawara, le fleuve est pérenne.

De Bakel à Kaédi (Mauritanie), le fleuve suit une direction SE-NW puis prend une orientation E-W jusqu'à la côte et longe celle-ci (N-S) sur une vingtaine de kilomètre avant de se jeter dans l'Océan Atlantique à St Louis.

La station de Bakel est la principale station sur le fleuve Sénégal. C'est la station de référence du fleuve. Elle contrôle en une station unique, l'ensemble de l'écoulement du haut bassin en toutes saisons (Guiguen et Lérique, 1977).

I.2.3. Sol et végétation

Bakel présente des sols à dominance ferrugineux tropicaux du type lessivé avec concrétionnement de cuirasses affleurants et des sols hydromorphes. Une maigre savane herbeuse couvre les cuirasses ferrugineuses.

La végétation dans la vallée du fleuve est caractérisée par de nombreux *Acacia nitocica* dans les cuvettes de décantation, de *Balanites aegyptiaca*, d'*Acacia seyal* et de *Zizyphus mauritania*. Bakel est le pays des forêts sèches et des savanes boisées soudaniennes. On y trouve un mélange de beaucoup d'espèces d'arbres et herbes comme: Bombax, *Sterculia*, *Pterocarpus erinaceus*, *Combretum*, *Terminalia*, *Anogeissus* ... et les grandes *Andropogonées* (*Pennisetum subangustum*, *Panicum*, *Brachiria*).

I.3. Hydroclimatologie de la zone

I.3.1. Climatologie

La vallée du fleuve Sénégal se situe dans le domaine sahélien. Le climat à Bakel s'intègre dans la zone tropicale semi-aride caractérisée par un climat de type Soudano-Sahélien. Cette zone est caractérisée par deux saisons : une saison sèche qui dure longtemps de huit à neuf mois (Octobre à Mai) et une saison des pluies ou humide de trois à quatre mois (Juin à Septembre). Le régime éolien de Bakel est directement lié à la position du Front Intertropical (FIT). Pendant la saison sèche l'anticyclone des Açores influence le climat sur toute la vallée du fleuve Sénégal avec la circulation d'alizés continentaux Est à Nord-Est. Ces vents intermittents une certaine fraîcheur avec quelques pluies à Bakel. Au mois de mars jusqu'au mois de juin, les vents d'Est appelés Harmattan apportent un flux d'air chaud et très secs dans la zone. En période d'hivernage, un vent sud à Sud-Ouest subit un parcours maritime et apporte une importante quantité d'air humide provoquant l'arrivée des pluies sur toute la zone de Bakel.

L'analyse de la figure 4 montre l'absence de précipitation pendant huit mois. Le pic (360,2 mm) est noté entre août et septembre, mois auxquels on enregistre les pluies maximales dans la région.

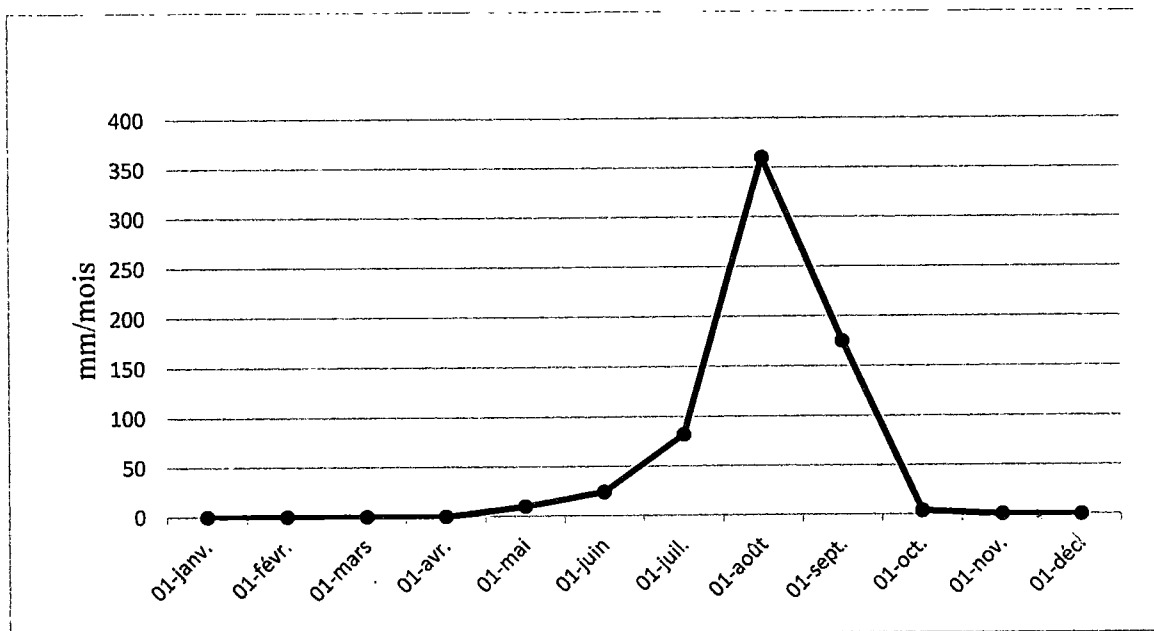


Figure 4 : Pluviométrie mensuelle de la station de Bakel en 2007(source OMVS)

Sur la période de 1952 à 2001, la moyenne pluviométrique de la station de Bakel ne révèle pas une grande variabilité (tableau 1). Les années 1970 ont été marquées par une forte sécheresse dans presque tout le pays. L'impact de cette sécheresse est peu constaté dans la région.

Tableau 1 : Cumul des moyennes pluviométriques par décennie de la station de Bakel (période de 1952 à 2001, source : OMVS).

Années	[1952-1961]	[1962-1971]	[1972-1981]	[1982-1991]	[1992-2001]
Bakel (mm)	458	572	477	479	495

I.3.2. L'évapotranspiration

Le terme évapotranspiration prend en compte la combinaison de l'évaporation directe à partir des surfaces libres, des sols nus et de la transpiration végétale. L'évaporation entraîne la diminution de la crue du fleuve et une baisse considérable du niveau des nappes superficielles. Le tarissement est plus précoce au niveau des eaux de surface où la plupart des affluents deviennent sèches pendant le mois d'Avril. Pendant les mois de Mars à Mai, on note de températures élevées occasionnant une forte évaporation. La température dans la zone de Bakel peut atteindre jusqu'à 46°C pendant les mois de Mai. D'après les informations recueillies au

niveau de la station de Bakel, le niveau de l'eau diminue considérablement pendant la saison sèche. Ce niveau d'eau peut atteindre 12 m pendant la saison des pluies, il peut baisser jusqu'à 2,3 m ou plus, pendant la saison sèche. Selon Diagana, 1994, le volume d'eau perdu entre Bakel et Dagana par an avoisine les 4.10^9 m³ de 1988 à 1991, seulement 6% de ce volume alimente la nappe. En raison des conditions climatiques défavorables dans la vallée, cette recharge est reprise à 98% par le phénomène évaporatoire. La reprise évaporatoire pendant la saison sèche pourrait être le principal facteur d'épuisement de la réserve en eau du bassin. Un bac d'évaporation permet d'estimer l'intensité des pertes d'eau observées au niveau des eaux de surface. Le pic d'évaporation peut atteindre dans la zone jusqu'à 310 mm/mois pendant la saison sèche (Fig. 5). Par corrélation, les pertes d'eau au niveau du bassin pourraient atteindre les 300 mm/mois.

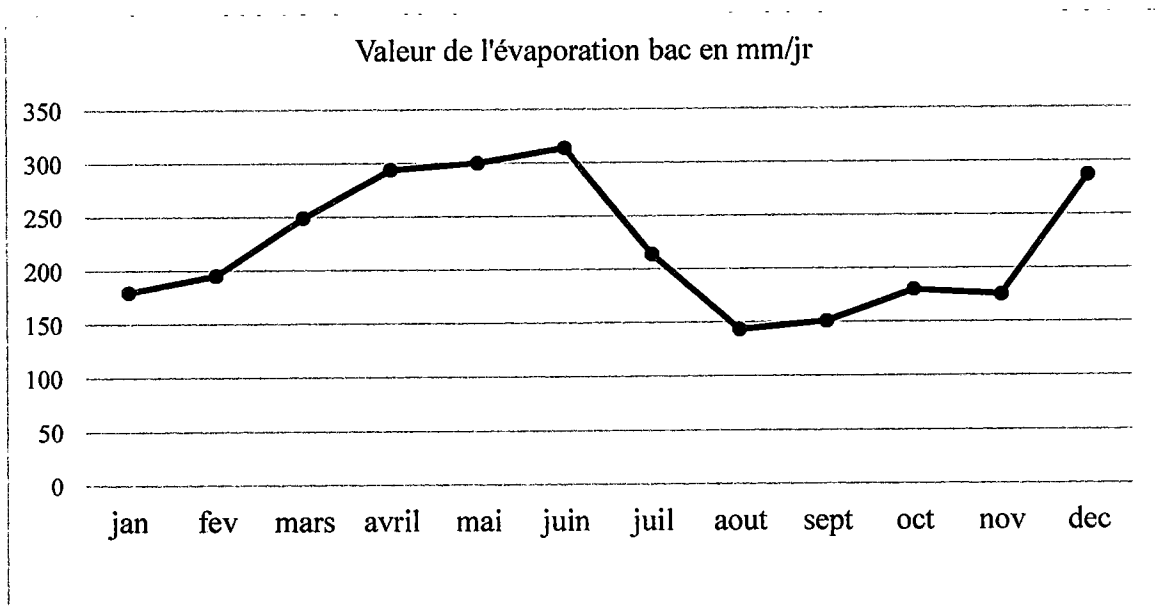


Figure 5 : Evaporation bac de la station de Bakel de l'année 2014 (source : station météorologique de Bakel)

I.4. Aspect socio-économique

Le département de Bakel est à majorité habité par des Soninkés, on y trouve aussi des Peulhs, des Bambaras, des Wolofs et des Maures. La population démographique est estimée à 192522 habitants à dominance féminine (96 hommes pour 100 femmes) sur une superficie de 22378

km² avec une densité de 9 hbts/km². Pendant la période coloniale, Bakel était prospère grâce au commerce de la gomme et de l'arachide. Aujourd'hui l'agriculture (coton, mil, fonio, maïs, arachide) et l'élevage demeurent les principales activités pratiquées dans cette commune.

II. CADRE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

II.1. Cadre géologique

Le bassin versant du fleuve Sénégal se situe dans la bordure sud-ouest du Craton Ouest Africain (figure 6). C'est une immense Craton d'environ 4.500.000 km² de surface. Il est formé d'un ensemble de chaînes largement granitisées et métamorphisées au Cambrien ancien. Le craton est surmonté d'une couverture sédimentaire horizontale, d'âge précambrien supérieur et carbonifère et s'entoure de zones mobiles liées aux orogénèses Panafricaine à l'Est, Panafricaine et Hercynienne à l'Ouest (Dabo, 2011).

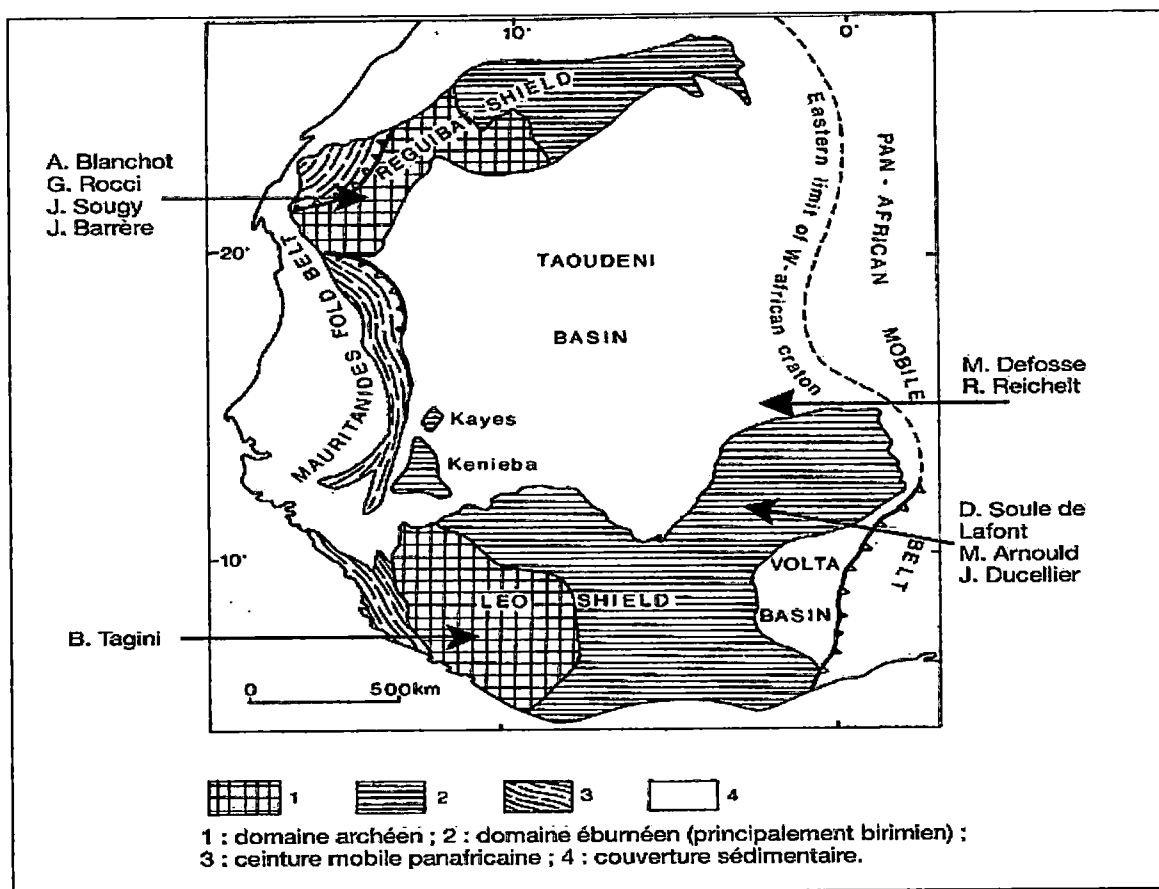


Figure 6 : Carte géologique de l'Afrique de l'Ouest (Dallmeyer, Lécorché, 1991 *in* Rocci, 2012)

Ce bassin appartient au bassin Sénégal-Mauritanien. Le bassin côtier est constitué de terrain Mésozoïque et Cénozoïque qui sont tabulaires et discordants sur les formations plus anciennes. C'est un bassin côtier mis en place suite à la transgression et régression marine (Diaw, 2008). La zone est affectée par une tectonique cassante polyphasée mais surtout par une tectonique souple marquée par des plissements isoclinaux serrés, souvent redressés. Deux entités géologiques coiffent la zone de Bakel : les formations du socle et les formations du bassin sédimentaires. La sédimentation dans le bassin, en général a pour origine une subsidence qui se traduit par un affaissement continu du bassin depuis le Jurassique, et par le jeu de comportements des fractures qui découpent les roches dures du socle ancien et le surmonte jusqu'à l'Eocène. Les formations du Quaternaire, notamment celles alluviales du Sénégal, postérieures au phénomène tectonique, reposent sur un substratum accidenté (Diagana, 1994).

Les formations du bassin sédimentaire affleurant dans la vallée du fleuve sénégalais sont d'âge Crétacé supérieur et Tertiaire :

Le Maastrichtien : On le trouve dans tout le bassin sénégal-mauritanien. Il s'étend sur toute la vallée du fleuve Sénégal. Il est constitué de sable gréseux avec rares intercalations de petits bancs d'argile. Le Maastrichtien n'est pas affleurant dans la zone de Bakel.

L'Eocène moyen : Il est largement représenté dans le bassin du fleuve Sénégal. Il est subaffleurant ou même affleurant dans une partie importante de la vallée du fleuve en aval de Bakel. Il est constitué principalement de calcaires, des dolomies et des argiles. L'Eocène n'est pas représenté dans le département de Bakel, elle affleure au niveau de la vallée dans la région de Matam.

Le Continental Terminal : Son épaisseur est variable et peut atteindre 150 m. Il est constitué de sables argileux aux couleurs variées roses, beiges, jaunes, blanches, violacées bariolées, dans lesquels s'intercalent des niveaux argileux ou gréseux. En aval de Bakel le fleuve traverse un vaste bassin sédimentaire du Tertiaire. Il a entaillé les grès argileux du Continental Terminal et façonné une grande vallée alluviale (Michel, 1957 et Michel, 1973 *in* Michel, 1987). Le Continental Terminal n'est pas affleurant dans le département de Bakel. Il est affleurant tout au long de la vallée du Ferlo (dans la partie amont), et en bordure des alluvions de la vallée du Sénégal, entre Oourossogui et Aéré Poste (Diene, 1995).

Le Quaternaire : constitue le système le plus récent. Le Sénégal a creusé sa vallée pendant le Quaternaire ancien et moyen dans des sédiments tendres (Michel, 1957 et Michel, 1968 in Michel, 1973). Les formations du Quaternaire reposent généralement sur les formations de l'Eocène. Au niveau des dômes là où l'Eocène est absent, elles reposent directement sur le Maastrichtien. Les formations du Quaternaire sont constituées d'une part d'argile et de sable fin qui correspondent aux dépôts Post Noukchottien et d'autre part d'alluvions grossiers ou graveleux, de sables argileux correspondant aux formations de la période de l'Ogolien et du Quaternaire ancien et moyen (Kane, 2008). Le Quaternaire est bien représenté dans le département de Bakel.

Les formations du Sénégal Oriental sont constituées par la Série de Bakel. Elles occupent la presque totalité du département de Bakel. Elles correspondent à des formations métamorphiques (zone interne des Mauritanides du Sénégal) résultant de la formation tecto-métamorphique des formations de la Falémé et de Youkounkoun (Dabo, 2011). Ces formations métamorphiques sont constituées de roches vertes, schistes et quartzites à structures fines, bien représentées au nord de Bakel. Les formations sédimentaires comme le grès sont très peu abondantes dans la zone.

II.2. Cadre hydrogéologique

L'hydrogéologie dans le bassin du fleuve Sénégal est caractérisée par l'existence de différentes nappes sous-terraines qui correspondent à des formations géologiques différentes qui se sont mises en place respectivement au Primaire, à la fin du Secondaire, du Tertiaire et du Quaternaire (Kane, 2008.)

Bakel fait partie du Sénégal oriental caractérisé par une zone de perméabilité faible. Dans les roches sédimentaires comme les grés, les systèmes aquifères se réduisent à des cuvettes topographiques peu étendues, favorable à l'accumulation d'alluvions et de sables (Rochette, 1974).

II.2.1. Les différentes nappes et leur mode d'alimentation

En Afrique occidentale comme dans toutes les autres régions du globe, la pluie alimente en grande partie les nappes souterraines. Cependant, cette alimentation peut varier localement

voire même inexistante dans certaines zones à cause de la nature des formations aquifères et de la quantité de la pluie. Le Sénégal est un pays tropical caractérisé par un climat semi-aride, d'où les précipitations sont moyennes voire faibles. Dans ces zones les conditions d'infiltration sont précaires à cause de l'évapotranspiration. Dans la région d'étude, les zones imperméables ou peu perméables sont très peu alimentées directement par les eaux de pluies sauf en début de l'hivernage lorsque les larges fentes de dessiccation formées sur la couche argileuse de surface parviennent à atteindre les strates perméables (AUDIBERT, 1970 *in* Diaw 2008). En réalité, selon (Archambault, 1960), l'évaluation des quantités d'eau susceptibles de s'infiltrer constitue un des chapitres les plus difficiles de l'hydrogéologie. Il est important avant de préconiser l'exploitation d'une nappe aquifère de s'assurer de sa réalimentation après pompage. Le département de Bakel comprend deux systèmes d'aquifères.

Les aquifères du socle sont contenus dans les franges capillaires des roches anciennes et leur alimentation pourrait se faire directement au niveau des fractures.

Les aquifères des formations sédimentaires sont peu abondantes dans cette zone. Elles sont constituées en grande partie par les dépôts alluvionnaires. L'alimentation des nappes alluviales s'effectue d'une part par infiltration des eaux de ruissellement pendant la saison des pluies, d'autre part par le drainage durant toute l'année des nappes de glaciaires que les marigots entaille (A. Martin 1962). D'après H. Camus et J. Débuissou, l'essentiel de l'alimentation des nappes alluviales est fourni par les crues des marigots. Les nappes sédimentaires sont constituées par :

La nappe Maastrichtienne: elle affleure sur tout le bassin sénégalais. Elle se présente souvent en position captive. L'aquifère Maastrichtien est contenu dans les formations grésocalcaires et sablo-argileuses du Maastrichtien et du Campanien supérieur. Elle renferme les plus grosses réserves d'eau du Sénégal (DGPRES, 2006). La zone de recharge potentielle se situe le long de la vallée du fleuve Sénégal, là où les sables du Maastrichtien subaffleurent sont recouverts uniquement par les formations argilo-sableuses récentes des régions de Matam et Dagana. La nappe Maastrichtienne n'est pas affleurant dans le département de Bakel.

La nappe de l'Eocène : elle est présente sur tout le bassin Sénégal-mauritanien, excepté la zone d'affleurement ou subaffleurement du Maastrichtien où elle a été érodée. D'après Diagona 1994, les formations sédimentaires de l'Eocène sont plus ou moins perméables et contiennent d'importantes nappes phréatiques. Cette nappe n'affleure pas dans le département de Bakel. Elle couvre tout au long de la vallée, une bande entre Sémmé et au sud de Podor.

La nappe du Continental Terminal : communément appelée « nappe du Trarza » dans le bassin côtier mauritanien où il demeure la plus importante et la plus régulière. Toujours libre, c'est la première nappe (nappe phréatique) que rencontrent les puits des villages ou les zones de pâturages (Archambault, 1960). Selon une source de l'OMVS, la nappe du Continentale Terminale constitue la partie supérieure des formations de l'Eocène et elle est donc alimentée par les formations alluvionnaires du fleuve. L'alimentation de cette nappe semble se faire se faire uniquement au niveau sur les bordures par les crues du fleuve (Diagana, 1994). Cette nappe n'affleure pas dans le Département de Bakel, elle est présente à l'amont de Saldé, ainsi qu'à l'intérieur du pays jusqu'au Ferlo (DGPRES, 2006).

La nappe des alluvions : Cette nappe est contenue dans les sables plus ou moins argileux. Elle s'étend depuis le fleuve Sénégal jusqu'en Casamance. Dans le fleuve Sénégal, cette nappe va de Bakel jusqu'à Podor. C'est la nappe alluviale, au niveau du lit majeur des cours d'eau. Pendant la période d'hivernage, tout le lit majeur est inondé par les eaux de pluies, une infiltration directe serait donc possible. Selon Audibert 1970 (*in* Diagana, 1994), l'alimentation de cette nappe est théoriquement possible pendant la période de crue proprement dite (en Juillet, Aout et Septembre) par les eaux de pluies. Les études piézométriques ont montré que la nappe alluviale est alternativement alimentée et drainée par le fleuve (Diagana, 1994). Elle est bien représentée dans le département de Bakel.

II.2.2. Relation aquifères / fleuve et inter-nappes

La relation entre les différentes nappes (nappe alluviale, Eocène, Maastrichtienne) est assez bonne dans la Vallée. Elle présente toutefois quelques variations spatiales (Kane, 2008). La communication entre plusieurs nappes peut jouer le rôle de modérateur et de régulation des écoulements.

Les eaux souterraines de la vallée du fleuve Sénégal appartiennent à trois aquifères (Maastrichtien, l'Eocène, Continental Terminal) qui sont superposés avec la nappe des alluvions. Dans la zone de Podor, la communication entre la nappe alluviale et celle de l'Eocène est très bonne. L'IRD estime que le volume d'eau échangé entre le fleuve et la nappe est de l'ordre 330 millions m³/an en 1989. Ce volume varie fortement avec l'hydraulicité de l'année. Dans la zone de Bakel, les nappes alluviales pourraient être alimentées directement à partir des eaux de pluies et des eaux du fleuve. Ces nappes alluviales reposent localement sur

les nappes de socle, ces zones pourraient être des endroits privilégiés d'infiltration pour les nappes profondes (socle).

II.2.3. Nature hydrochimique des différentes nappes de la zone

Les eaux souterraines du bassin du fleuve présentent généralement une qualité médiocre. Ces eaux présentent une forte teneur en sel. En effet, la présence de sel dans l'ensemble de la vallée et du delta est d'origine marine. En plus l'absence de système approprié d'évacuation des eaux de drainage des périmètres irrigués accentue cette mauvaise qualité. Par contre Dans certaine partie de la vallée, comme à Bakel, les eaux de la nappe alluviale présentent une assez bonne qualité et très utilisées pour l'approvisionnement en eau potable. Elles présentent souvent une minéralisation assez faible (tableau 1, annexe II) témoignant l'absence de la présence de sel. Les nappes contenues dans les formations schisteuses de la zone de Bakel, présente une eau peu minéralisée. On le chiffre à 600 mg/l (Wuilleumier et al. 2010).

CHAPITRE II: CARACTERISTIQUES ET POTENTIALITES DE LA NAPPE ALLUVIALE DE BAKEL

I. METHODOLOGIE

Différentes études ont été consultées pour mener à terme ce présent mémoire et comprendre le fonctionnement hydrogéologique de la zone. Comme souligné dans l'introduction, peu d'études hydrogéologiques ont été effectuées pour connaître les caractéristiques de la nappe alluviale dans le département de Bakel. Il s'agit principalement :

- Les études antérieures de Camus et Debuissou, (1963), qui porte sur l'étude hydrogéologique des terrains anciens du Sénégal Oriental.
- La thèse doctorale de Diagana, (1994), qui étudie les nappes alluviales dans la vallée du fleuve Sénégal de Bakel à Dagana, même si elle ne nous fournit pas des renseignements précis dans le secteur de Bakel.
- L'étude de faisabilité des ouvrages de remplissages et de vidanges des cuvettes du bassin du fleuve Sénégal, (OMVS, 2006).
- Etude diagnostique pour la mise en place et la réhabilitation du réseau piézométrique dans le bassin du fleuve Sénégal, (Kane, 2008).
- Les études récentes de Mall, (2009), qui a pour thème la contribution à l'étude hydrogéologique en Zone socle : Cas du Sénégal Oriental.
- La notice explicative de la carte hydrogéologique du Sénégal Oriental de Wuilleumer *et al*, (2010), qui nous a fourni des informations intéressantes.
- L'étude la plus récente a été réalisée par la DGPRES, (2014), portant sur Etude hydrogéologique de la nappe des sables alluvionnaires entre Bakel et Kidira et l'étude hydrologique de la Falémé dans la zone de Kidira. Cette étude ne nous fournit pas aussi des informations sur notre domaine, le secteur d'étude s'était effectué au nord de Bakel.
- Certains rapports de forage des localités de Diawara, de Moudéri, de Tuabou et de la commune de Bakel ont été aussi consultés. Ils nous ont fourni des informations capitales sur la lithologie et les caractéristiques hydrodynamiques des terrains aquifères.

Pour renforcer les informations et les données obtenues par la documentation, une visite de terrain a été faite au niveau du département de Bakel. Les mesures ont été faites au Nord du

département, plus précisément dans les localités de Diawara, de Moudéri, de Gabou (Moribougou, Koungany), de Tuabou et au sein même de la commune de Bakel. L'ensemble des mesures et échantillonnages ont été faits au niveau des puits dans certains forages et au niveau du fleuve Sénégal.

I.1. Les matériels de mesure

Dans cette campagne de terrain les matériels suivants ont été utilisés :

Le « Global Positioning System : (GPS), ou le système de positionnement global : C'est un appareil de pointe qui permet de déterminer la position géographique de l'ouvrage au niveau duquel on se trouve.

La sonde : La série KL 010 a été utilisée pour les mesures, c'est une sonde piézométrique de terrain permettant de mesurer ponctuellement le niveau d'eau dans les forages, des piézomètres et des puits.

Notre travail, ayant aussi pour but de déterminer les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines, et les matériels d'échantillonnage sont des bouteilles en plastique de 0,75 litre et une glacière pour la conservation et le conditionnement des échantillons à analyser.

I.2. Méthodologie de mesure

Le niveau d'eau est détecté par conductivité. Lorsque la sonde atteint la surface de l'eau, un contact électrique s'établit entre les deux électrodes du capteur, déclenchant un signal sonore et lumineux. La profondeur peut alors être lue sur le ruban gradué. Ensuite, on mesure la hauteur de la margelle, pour déterminer le niveau réel de l'eau par rapport à la surface topographique.

Les échantillons ont été pris au niveau des puits et au niveau du fleuve Sénégal. Au niveau de chaque point d'eau, les bouteilles ont été rincées deux à trois fois avant de remplir la bouteille. Ces échantillons sont ensuite conservés dans une glacière et acheminés pour les analyses hydrochimiques au laboratoire du département de la géologie de l'Université Cheikh Anta Diop.

I.3. Les outils de traitement des données

Après la collecte et les différentes analyses, les données ont été traitées par différents logiciels.

Le logiciel d'Arc Map 10.1 : C'est un logiciel de Système d'Information Géographique développé par la société américaine ESRI. Ce logiciel plus connu sous le nom d'Arc Gis nous a permis de cartographier les données spatiales recueillies sur le terrain à partir du GPS.

Le logiciel Diagramme : C'est un logiciel d'hydrochimie développé par l'université d'Avignon permettant de faire différents traitements. Ce logiciel nous permis de calculer la balance la balance ionique, de tracer le diagramme de Piper et de déterminer les indices de saturation.

Le logiciel tableur Excel : qui est une suite bureautique développée par Microsoft nous a permis de représenter les différents paramètres chimiques sous forme d'histogramme et de tracer les diagrammes binaires.

I.3. Représentation géographique des données

Le logiciel ARC GIS 10.1, nous a permis grâce aux coordonnées géographiques des différents ouvrages de tracer la carte (fig. 7).

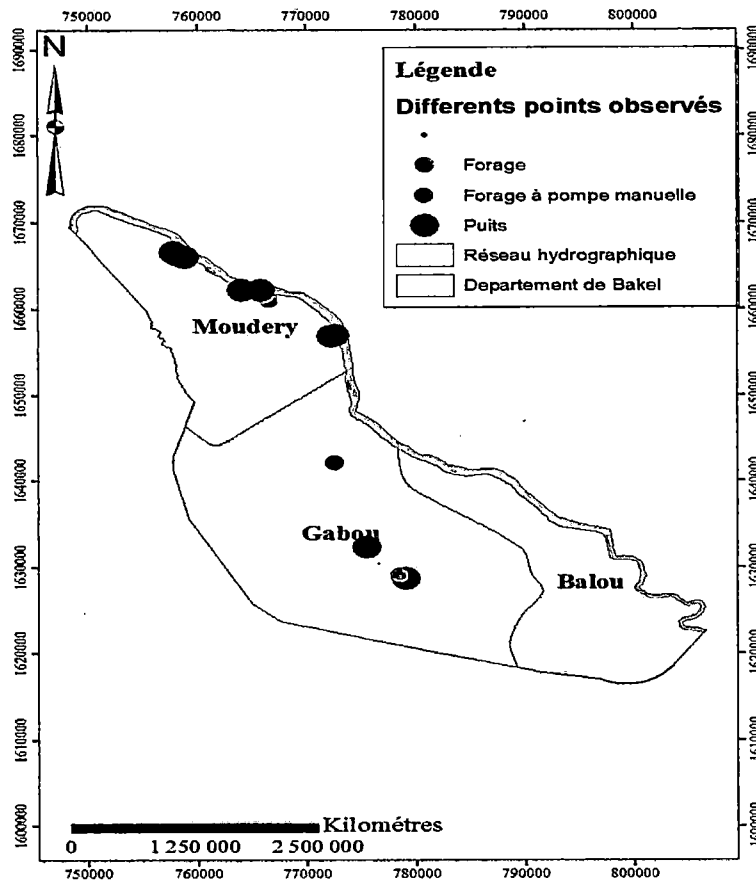


Figure 7 : carte de la représentation des différents points d'eau observés

II. POTENTIALITE DE LA NAPPE ALLUVIALE

II.1. Nature du réservoir aquifère

II.1.1. Lithologie de l'aquifère

Comme écrit précédemment, la zone de Bakel est marquée par la présence de deux aquifères, ceux du socle et ceux des alluvions.

Les aquifères du socle sont contenus dans les franges d'altération des roches cristallines précambriennes (Kane, 2008). Les nappes de socle sont captées à des débits pouvant varier de 2, 5 à 20 m³/h, elles sont souvent très exploitées entraînant rapidement leur tarissement.

Les nappes de remplissages alluviaux constituent par endroit les aquifères les plus intéressants. Elles sont le plus souvent en communication avec les eaux du fleuve, elles peuvent donc être permanentes durant toute l'année surtout celles qui se trouvent au niveau des lits du fleuve. Elles sont d'une extension très limitée dans la zone de Bakel (fig. 8). Elles constituent de ce fait une zone préférentielle d'installation de forage et surtout des puits traditionnels.

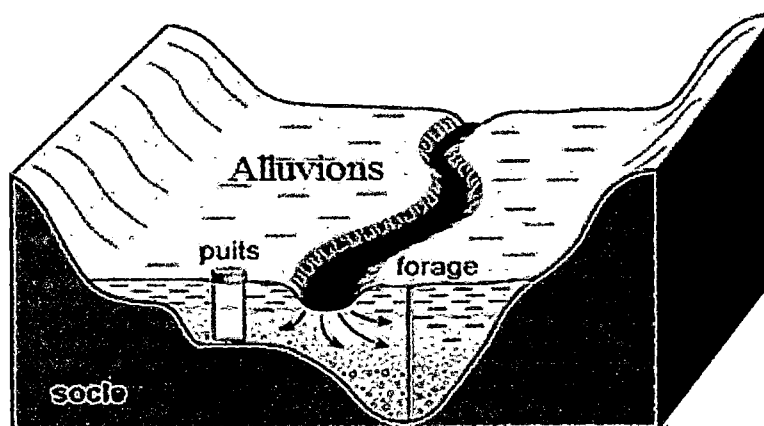


Figure 8 : L'eau souterraine dans les dépôts alluviaux de rivière (MacDonald, 2005)

Les coupes lithologiques contenues dans les rapports de forage consultés ont été représentées à la figure 9, les profondeurs sont en mètres. Ces forages sont géologiquement localisés dans des villages situés dans la plaine alluviale :

- Dans la localité de Moudéri : On a un forage captant une nappe alluviale monocouche constituée d'alluvions très grossières situées à un niveau peu profond (17 m) qui est productrice.

- Dans la localité de Diawara : On trouve un forage captant deux nappes superposées, une qui est constituée d'alluvions et une nappe contenue dans les fissures du substratum schisteux.
- Dans la localité de Tuabou : Deux forages y ont été localisés. Un forage captant la nappe alluviale et un forage captant deux nappes aquifères superposées (socle/alluvions).

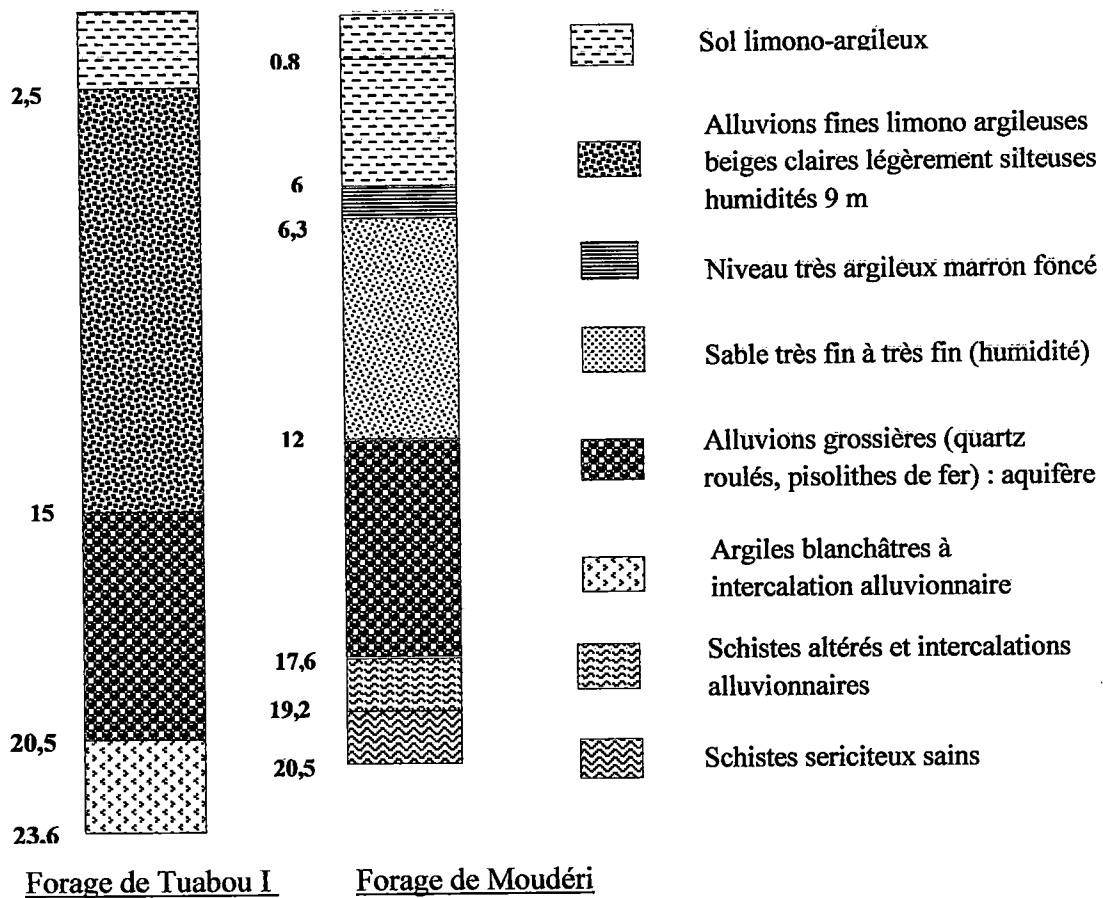


Figure 9 a : coupe lithologique des forages captant la nappe alluviale

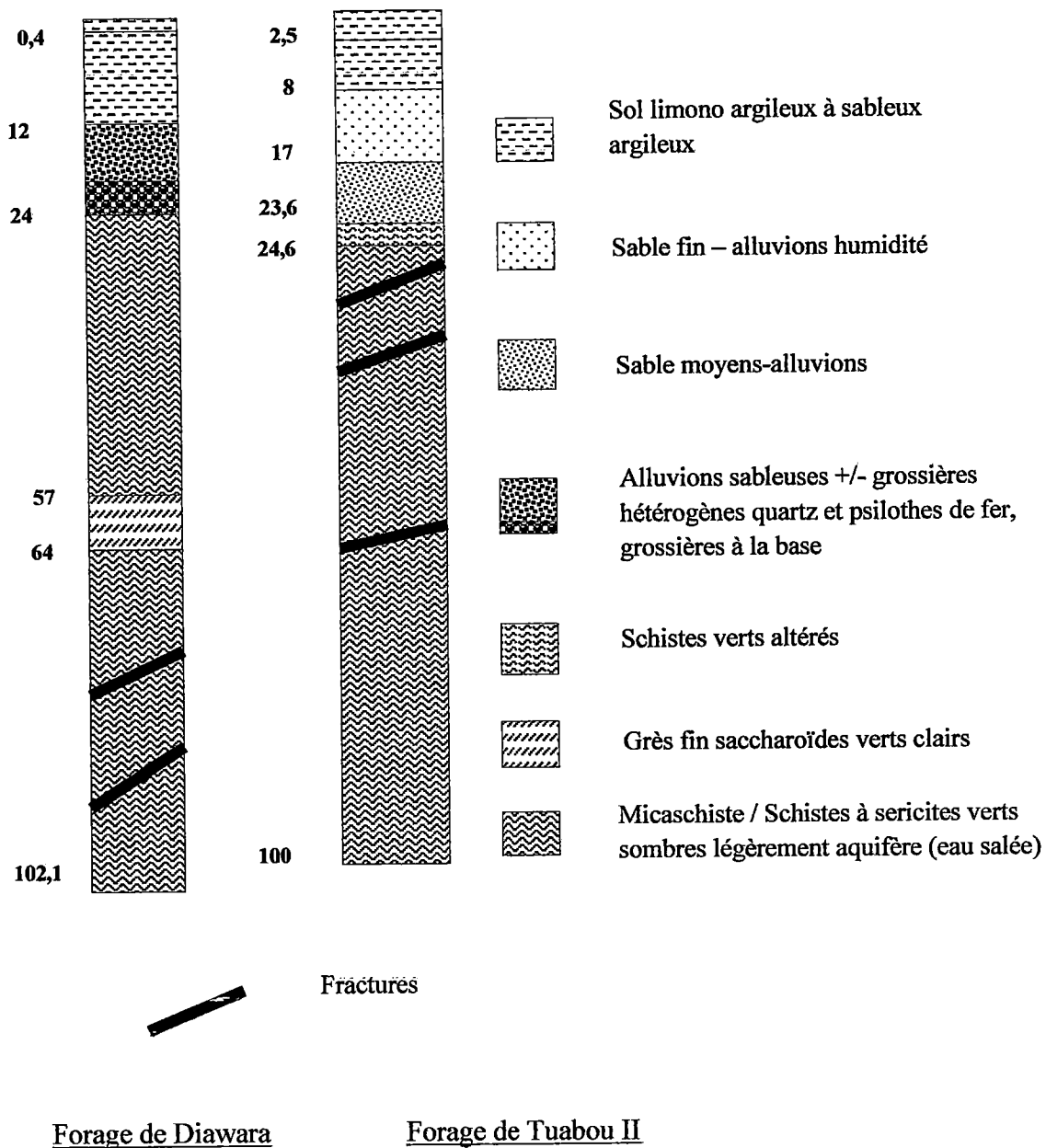


Figure 9a : Coupe lithologique captant les nappes bicouches (Socle/nappe alluviale)

Figure 9 : Coupe lithologique des formations traversées par les forages dans la zone d'étude.

Ce réservoir fait partie des unités aquifères exploitables du Sénégal, surtout dans les zones rurales. Il est situé dans les formations alluvionnaires, constituées par endroit de sables grossiers et des alluvions grossières hétérogènes (pisolithes de fer, quartz et de schistes). La présence de deux nappes superposées (socle et alluviale), pourrait être causée à une variation latérale des faciès due à des phénomènes tectoniques.

II. 1. 2. La profondeur de la nappe dans la zone

Les niveaux statiques obtenus à partir des données anciennes sont consignés dans le tableau 2.

Tableau 2 : niveau statique des différents forages

Nom de localité	Niveau Statique en m
Moudéri	9,06
Diawara	10,72
Tuabou I	10,92
Tuabou II	11,71
Bakel	9,32

Pour confirmer ces données, les mesures de niveau ont été faites, elles ont été réalisées en période d'étiage (mois de Mars), caractérisée par de forte température dans la zone. Les profondeurs varient entre 9 m et 13,45 m (tableau2 annexe II). Les puits situés dans la localité de Diawara et le forage à pompe manuelle situé dans la localité de Moribougou présentent les niveaux d'eau les plus profonds (jusqu'à 13,45 m). Malgré la période de mesure, la zone d'étude offre des niveaux d'eau peu profonds, cela pourrait être dû à un soutient de base entre la nappe alluviale et le fleuve.

Bakel est en cheval entre la haute vallée du fleuve et la partie orientale du Sénégal, les nappes sont contenues dans des nappes discontinues. La carte piézométrique de la zone n'a pas pu être tracée, c'est une zone dépourvue de piézomètres et de données de nivellement.

II. PARAMETRES CARACTERISTIQUES DE L'AQUIFERE

Les propriétés hydrodynamiques permettent d'analyser de façon quantitative l'aptitude d'une formation géologique à contenir de l'eau et d'en laisser circuler.

Les paramètres hydrodynamiques ont été recueillis au niveau des rapports de forage consultés à la Direction de Gestion et de la Planification des Ressources en Eau (DGPRE). Ils ont été déterminés à l'aide de pompage d'essai. La transmissivité a été calculé par la formule suivante :

$$s = \frac{0.183. Q}{T} . \log t$$

s = rabattement en m ;

Q = débit en m³/s

T = transmissivité en m²/s

t = temps de pompage en s

Les valeurs de transmissivité obtenues pour les localités de Diawara, de Moudéri et de Tuabou sont respectivement représentées au niveau du tableau 3 : les noms des forages portent les noms localités.

Tableau 3 : Valeurs de transmissivité des différents forages captant la zone.

Localités	Transmissivité (en m ² /s)
Moudéri	(4.54 à 4.44).10 ⁻³
Diawara	(2.9 à 1.3).10 ⁻⁴
Tuabou F _I	3.8.10 ⁻² à 1.4.10 ⁻³
Tuabou F _{II}	3,7.10 ⁻⁵

Les valeurs de transmissivité varient de l'ordre de 10⁻⁵ à 10⁻² m²/s. Ces valeurs diffèrent selon le type d'aquifère qui est capté. Elles sont plus importantes dans la localité de Tuabou I et de Moudéri où la nappe est contenue dans les formations alluvionnaires constituées de sables plus ou moins grossiers quartzeux et latéritiques. Elles deviennent plus faibles dans les forages de Tuabou II et Diawara, où la nappe du socle et celle alluvionnaire sont en même temps captées.

Diagana, 1994, avait déterminé la valeur de la transmissivité par la méthode de Jacob dans la vallée du fleuve Sénégal. La valeur de cette transmissivité est $9,7.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ au niveau des formations du Quaternaire. On peut en déduire que les alluvions sont caractérisés par une transmissivité assez bonne.

Une fois que les valeurs de transmissivité connues, on peut déduire l'épaisseur de l'aquifère de manière approximative à partir des coupes lithologiques et calculer ainsi les valeurs de conductivités hydrauliques (tableau 4) à partir de la formule suivante :

$$k = \frac{T}{b}$$

K = conductivité hydraulique en m/s

T= transmissivité en m^2/s

b= épaisseur de l'aquifère

Tableau 4 : valeurs de conductivité des différents forages captant la zone

Localités	Epaisseur de l'aquifère en m	Conductivité hydraulique en m/s
Moudéri	9,54	$4,71.10^{-4}$
Diawara	42	5.10^{-6}
Tuabou I	10,08	$3,77. 10^{-3}$ à $1,39.10^{-4}$
Tuabou II	45	$8,22.10^{-7}$

Les valeurs de conductivités hydrauliques sont très variables. Les forages de Tuabou I et de Moudéri sont plus perméables, les aquifères sont contenus dans des alluvions grossières. Par contre, les forages de Diawara et de Tuabou II ont une perméabilité moyenne à faible, l'aquifère capté est contenu dans les formations alluvionnaires et les formations schisteuses du socle.

Les valeurs de coefficient d'emmagasinement obtenues à partir de la bibliographie ont été consignées au niveau du tableau 5. Ces valeurs diffèrent selon le type d'aquifère.

Tableau 5 : valeur théorique du coefficient d'emmagasinement (Domenico (1972) and Mercer et al, (1982))

Types de roches	Coefficient d'emmagasinement S (m^{-1})
Argile tendre	$2.10^{-2} - 2,6.10^{-3}$
Argile rigide	$2,6.10^{-3} - 1,310^{-3}$
Argile moyennement dure	$1,3.10^{-3} - 9.2.10^{-4}$
Sables grossiers	$1.10^{-3} - 4,9.10^{-4}$
Sables denses	$2.10^{-4} - 1,3.10^{-4}$
Graviers sableux dense	$1.10^{-4} - 4,9.10^{-5}$
Roches fissurées	$6,9.10^{-5} - 3,3.10^{-6}$
Roches saines	Moins de $3,3.10^{-6}$

III. LES SOURCES D'APPROVISIONNEMENT EN EAU DE LA ZONE

III.1. Les eaux de surface

L'alimentation en eau potable de la ville de Dakar est assurée à 40% par le lac Guiers. Ce lac est principalement alimenté par le fleuve Sénégal par le canal de Taouey. Le fleuve constitue donc une source d'approvisionnement importante. Il est aussi beaucoup utilisé par les populations situées dans les environs.

Dans le département de Bakel, l'eau du fleuve est utilisée à de multiples fins (élevage, agriculture AEP), il est le principal cours d'eau pérenne. Malgré les risques de pollution, la population utilise parfois l'eau du fleuve pour la boisson lors des périodes de pénuries d'eau.

III.2. les eaux souterraines

L'approvisionnement en eau est assuré par plusieurs forages dans notre zone d'étude. Les forages ont été localisés dans le tableau 6.

Tableau 6 : les forages localisés dans la zone d'étude et leur débit d'exploitation.

Localités	Coordonnées (X, Y)		Débit d'exploitation (m ³ /h)	Type de nappe
Bakel	-12,46	14,9	71	Quaternaire
Tuabou F _I	-12,47	14,98	40	Quaternaire
Tuabou F _{II}	-12,47	14,98	3	Alluviale_socle
Moudéri	-12,56	15,04	45	Quaternaire
Diawara	-12,56	15,01	9.0	Alluviale_socle
Gabou F _I	-12,52	14,72	5	Socle
Gabou F _{II}	-12,52	14,72	6	Socle
Kounghany	-12,4	14,84	11,5	Socle

Les forages captant la nappe alluviale sont productifs, de faible profondeur (20 à 23 m) avec une eau de bonne qualité. Les forages de Tuabou II et de Gabou II présentent une qualité un peu salée et leur débit d'exploitation est très faible, ces forages assez profond (100m), captent les formations schisteuses du socle.

On peut constater à partir de ce tableau une légère étude comparative entre les nappes alluviales et les nappes de socle. Ces données indiquent que les nappes alluviales sont plus productives que celles situées dans le socle. Cela est confirmé par les études réalisées par Camus et Debuisson, (1963), d'après les résultats de leurs analyses, ils recommandent l'exploitation des nappes alluviales. Ils pensent que le recours aux seules nappes alluviales est le plus souvent la solution la plus simple et la plus sûre. Tous les puits qu'ils ont eus à visiter pendant leur campagne traversent une épaisseur plus ou moins importante d'alluvions avant de recouper les terrains métamorphiques du Socle.

Lors de la campagne de terrain certaines informations ont été recueillies au sein de la population.

La localité de Gabou existe deux forages F_I et F_{II}, leur débit d'exploitation est respectivement 6 m³/h et 5 m³/h, avec un château d'eau de 50 m³. Les bornes fontaines fonctionnent seulement dans la matinée jusqu'à 12h à cause du manque de gasoil. Le reste de la journée les femmes utilisent les eaux des puits pour compléter leur besoins. Récemment, avec le réseau de l'ASUFOR plus de 70 maisons sont maintenant bénéficiées de nouvelle bornes fontaines.

Dans les localités de Moudéri, de Diawara et de Tuabou, les puits se trouvent le plus souvent au sein des maisons, et ils sont utilisés à plusieurs fins, même parfois pour la boisson.

IV. COMPOSITION HYDROCHIMIQUE DE LA NAPPE

L'étude des paramètres hydrochimiques a été réalisée sur la base des analyses chimiques effectuées sur les échantillons d'eaux prélevés.

IV. 1. Vulnérabilité des nappes alluviales

La vulnérabilité peut être définie comme la défense naturelle de l'eau souterraine contre les menaces de pollution, en fonction des conditions hydrogéologiques locales.

La vulnérabilité d'une nappe peut être évaluée par plusieurs méthodes parmi les quelles, la méthode DRASTIC. Cette méthode est mise en évidence à partir de plusieurs paramètres dont la texture du toit de l'aquifère. Donc plus un aquifère est perméable plus cet aquifère est vulnérable à la pollution. Cependant, même si Bakel est constitué d'une partie de nappe alluviale de faible profondeur, les sols sont tapissés d'horizon argilo-sableux qui sont peu perméable. Ces horizons peu perméables pourraient jouer un rôle de filtre pour certains polluants. Les nappes d'altération ou de fracture situées dans la zone de socle sont plus vulnérables à la pollution. Ces nappes sont situées au niveau des fractures (failles), favorable à l'infiltration des polluants surtout pendant les périodes de recharge.

IV.1. 1. Définition de la norme de qualité pour l'eau potable

La qualité de l'eau de boisson suscite des inquiétudes pour la santé humaine dans le monde entier. C'est pour cela que l'Organisation Mondiale pour la Santé (OMS), a instauré quelques valeurs guides pour contribuer à garantir la salubrité de l'eau de boisson.

Selon l'OMS, une eau potable désigne l'eau utilisée à des fins domestiques, la boisson, la cuisine et l'hygiène personnelle. Sur ce lancé, une surveillance de l'eau par des analyses chimiques doit être régulièrement faite pour s'assurer de la potabilité de l'eau. Cette analyse aura pour but d'évaluer toutes sortes de contaminations et de pollutions.

Au Sénégal, l'article 51 de la loi n°81-13 du 4 mars 1981 portant sur le code de l'eau, indique que les eaux d'alimentation doivent satisfaire les normes de potabilités en vigueur notamment en ce qui concerne leurs caractéristiques physiques, chimiques, biologiques et bactériologiques.

IV.1.2. Sources de pollution de la zone

Un milieu est dit pollué lorsque son équilibre a été modifié de façon durable par l'apport de quantités trop importantes de substances plus ou moins toxiques d'origines naturelles ou issues d'activités humaines. La pollution de l'eau survient quand les éléments qui composent cette dernière dépassent les normes fixées par le pays. La pollution de l'eau peut entraîner divers types de complications, l'augmentation de la mortalité de certaines espèces animales et végétales, et détériorée la qualité de l'eau au point de la rendre impropre à n'importe quelle utilisation.

IV.1.3. Pollution par les eaux usées et les ordures ménagères

Cette pollution est due à la fois à l'évacuation des déchets contenus dans les fosses septiques, aux eaux usées utilisées pour les tâches ménagères, et aux ordures ménagères.

Le département de Bakel ne dispose pas de réseaux d'assainissement, l'évacuation des déchets contenus dans les fosses est assurée par des camions de vidanges, et ensuite déversés dans des sites anarchiques.

Le ramassage des ordures ménagères est assuré par des charrettes et ensuite déposées au niveau des sites, soient choisi par la mairie de chaque localité soient au niveau des sites anarchiques choisi par les populations locales. Ces ordures ménagères accumulées dans des décharges anarchiques peuvent libérer des lixiviats riches en polluants.

Comme dans la plupart des localités du Sénégal, les fosses septiques sont construites de manière précaire. Dans la localité de Moudéri où plusieurs puits ont été localisés au sein des maisons, les fosses septiques construites de manière précaire pourraient être une source de pollution.

IV.1.4. Pollution par l'agriculture

L'agriculture moderne favorise les cultures intensives et une utilisation abondante de fertilisants. Ces pratiques culturales peuvent apporter de risques énormes sur les eaux souterraines. L'utilisation excessive des engrais chimiques et/ou organiques peut entraîner le lessivage de certains éléments comme les nitrates. La présence des zones humides favorise fortement le développement de l'agriculture. Le fleuve Sénégal ainsi que toutes les dépressions présentent dans la vallée qui se remplissent en période de crue constitueraient des zones privilégiées de recharge. Selon (Malou et al, 2008), ces zones de recharges naturelles ont été modifiées par l'action anthropique avec les créations de périmètres agricoles.

En plus des aménagements hydroagricoles de la Société d'Aménagement et d'Exploitation des terres du fleuve Sénégal et de la Falémé (SAED) à Bakel, il y a beaucoup d'autres périmètres irrigués villageois tout au long de la vallée alluviale. Ces périmètres villageois s'alimentent directement à partir du fleuve ou à partir des puits traditionnels.

La pollution bactériologique n'est assez importante dans notre zone d'étude. La morphologie du fleuve (creuse), en dépression limite l'accès des animaux dans le fleuve. Par contre cette pollution bactériologique pourrait affecter directement la nappe lors de la période de forte recharge.

V. PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

Les caractéristiques physiques et chimiques des eaux souterraines dépendent d'un certain nombre de facteurs tels que la composition chimique et minéralogique des terrains traversés, la structure géologique, les conditions d'écoulement et les conditions physico-chimiques locales. Ces facteurs sont déterminés à l'aide d'analyse des échantillons prélevés sur le terrain effectué dans les laboratoires hydrochimique ou à des mesures effectués sur le terrain (in-situ). Les résultats chimiques des différents échantillons sont consignés au niveau du tableau 2 (annexe II).

V.1. La balance ionique

La balance ionique est l'expression d'une différence entre les charges positives (cation) et les charges négatives. Elle permet de contrôler la qualité des analyses effectuées sur les éléments majeurs. Cette balance est exprimée en pourcentage.

$$\text{NICB} = 100 * \frac{(\sum \text{CATIONS} - \sum \text{ANIONS})}{(\sum \text{CATIONS} + \sum \text{ANIONS})}$$

NICB (Normalized Inorganic Charge Balance) : La balance ionique exprimée en pourcentage.

\sum Cations : La somme des cations (unités en meq/l),

\sum Anions : La somme des anions (unités en meq/l).

Tout écart doit ainsi considérer comme erreur induit lors de l'analyse des échantillons. Les marges d'erreur sont définies dans cette fourchette :

$-1\% \leq \text{NICB} \leq 1\%$, Fiabilité des résultats d'analyses excellente.

$-5\% \leq \text{NICB} \leq 5\%$ Fiabilité des résultats d'analyses acceptable.

$-10\% \leq \text{NICB} \leq 10\%$ Fiabilité des résultats d'analyses médiocre.

$\text{NICB} \leq 10\%$ Fiabilité des résultats d'analyses mauvaise.

La balance ionique de chaque échantillon a été calculée (annexe II tableau n° 4). Sur les 23 échantillons analysés, seul 6 présentent une balance ionique élevée, il reste quand même dans la gamme de valeur tolérable.

V.2. Le pH

Les valeurs de pH obtenues sont comprises entre 6,62 et 8,25. Ces valeurs indiquent des eaux acides et neutres. La seule valeur de pH indiquant une eau basique a été localisée à Moribougou, localité située dans la commune de Gabou. C'est un puits traditionnel (sans couverture) situé à une centaine de mètres du fleuve et qui tarit rapidement pendant la journée. La marge de valeurs fixée par l'OMS pour la boisson est de l'ordre de 6,5 à 8,5.

V.3. La conductivité

Les valeurs de conductivité de la zone varient de 47,2 à 957 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. La valeur la plus faible a été mesurée au niveau du fleuve Sénégal dans la localité de Bakel, cette valeur indique une eau très faiblement minéralisée. Les valeurs de conductivité les plus élevées ont été mesurées dans la localité de Tuabou, dans un puits situé à une centaine de mètres du fleuve (814 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) et dans la localité de Gabou, dans un forage à pompe manuelle captant des roches schisteuses (954 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Les plus petites valeurs de conductivité ont été mesurées dans les puits non loin du fleuve, excepté celle mesurée dans la localité de Tuabou.

De cette analyse, ressort que les eaux du département de Bakel sont faibles à moyennement minéralisées. Les eaux souterraines du Sénégal oriental sont en règle générale peu minéralisées. Cette faible minéralisation globale cache cependant des disparités, les eaux des formations schisteuses des environs de Bakel présentent ainsi une minéralisation plus élevée (Wuilleumier, et al, 2010).

V.4. Faciès chimiques des eaux

Pour identifier les faciès chimiques les résultats chimiques des eaux ont été reportés sur le diagramme de Piper.

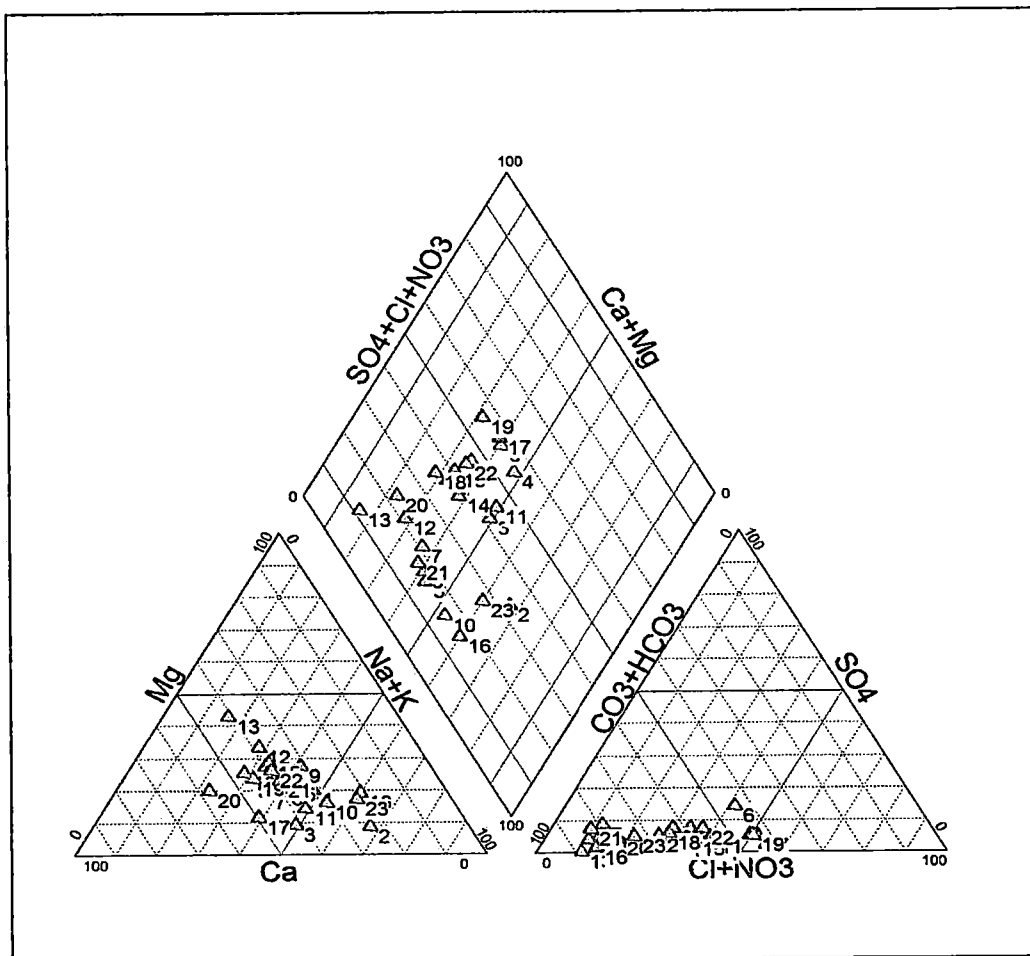


Figure 10 : Représentation en Diagramme de Piper des différents points échantillonnés.

Les différents résultats des analyses chimiques reportés sur le diagramme montrent des eaux :

Bicarbonaté mixte, Nitraté mixte, et Bicarbonaté sodique.

Le faciès bicarbonaté et mixte domine largement les autres faciès, il y représente presque 85%. Le faciès chloruré mixte et le faciès bicarbonaté sodique et potassique sont faiblement représentés dans la zone.

V.4.1. Composition anionique des eaux

Ces résultats montrent une large dominance des ions carbonates, avec une moyenne de 157,81 mg/l. Cette moyenne des carbonates double largement les autres ions avec 31,37 mg/l pour les chlorures, 39,65 mg/l pour les nitrates, 13,83 mg/l pour les sulfates qui présentent la

concentration la plus faible. Une concentration de nitrate à teneur élevée a été localement constatée dans la zone (fig.11).

V.4.2. Composition cationique des eaux

Les valeurs moyennes en mg/l des différents cations analysés se présentent comme suit (fig. 11) : $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$. La concentration en sodium domine légèrement dans certaines localités la concentration en calcium. Le potassium reste le cation le moins dominant en raison de son absorption par les argiles (Schoeller, 1962).

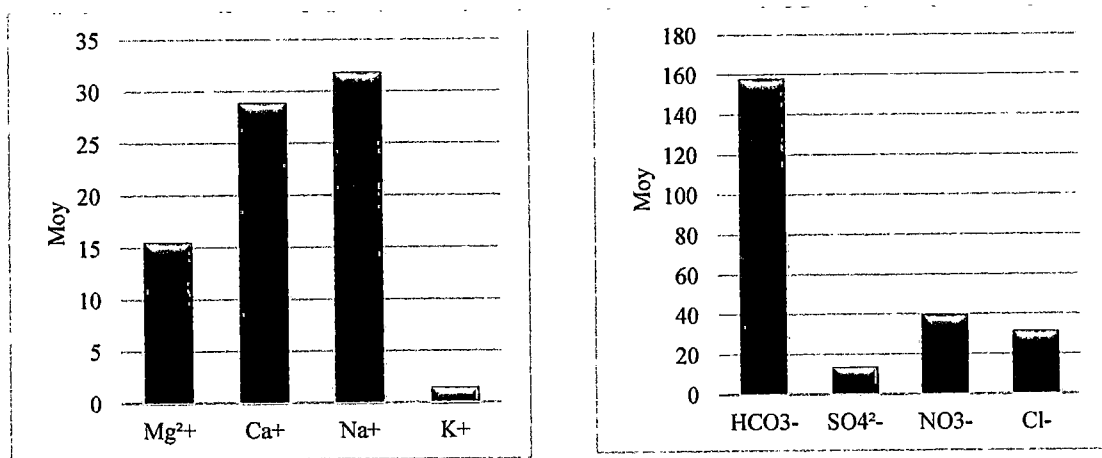


Figure 11 : Histogramme des ions majeurs en mg/l.

V.5. Les paramètres chimiques

V.5.1. Le sodium

Les teneurs en ions sodium sont comprises entre 3,15 mg/l et 93,38 mg/l. La concentration la plus faible a été enregistrée au niveau du fleuve Sénégal, et la plus élevée dans un puits situé dans la localité de Diawara. Dans l'ensemble, les plus petites concentrations de sodium ont été observées dans les puits qui sont plus proches du fleuve. D'après les résultats obtenus, aucune des concentrations ne dépassent la valeur standard fixée par l'OMS (fig.12).

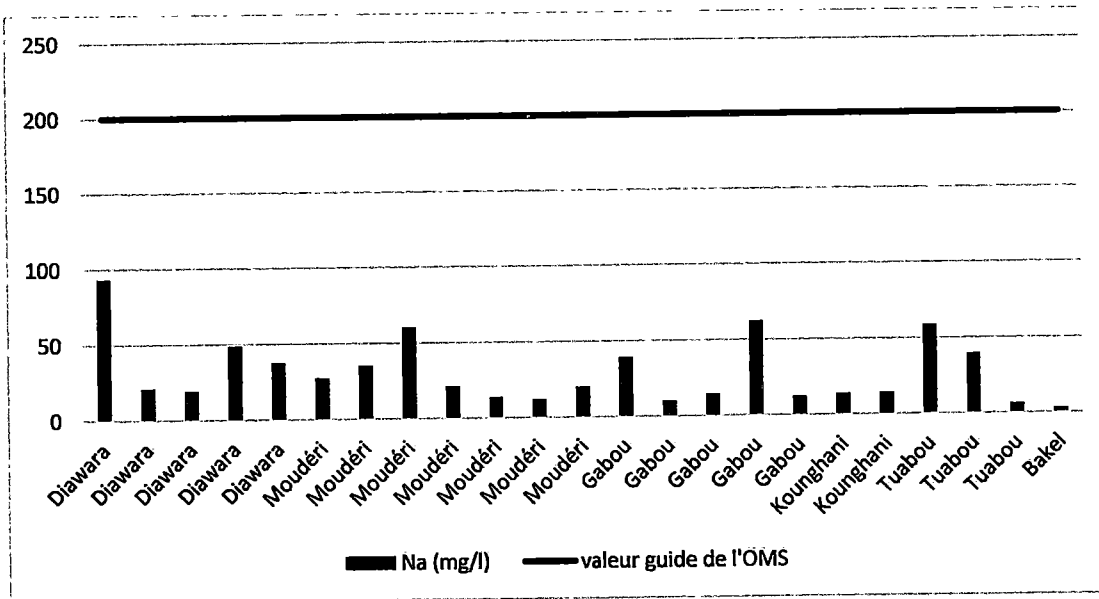
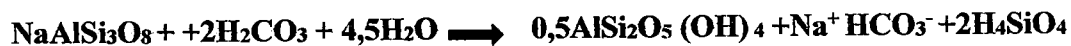


Figure 12 : Histogramme des concentrations en sodium

Le sodium est très abondant sur terre, on le retrouve dans les roches cristallines et les roches sédimentaires. La nappe alluviale de la zone de Bakel est contenue dans les formations aquifères alluvionnaires (argile, sable, graviers, quartz, schiste) ce qui pourrait justifier la présence du sodium dans la zone.

En plus, le rapport Na/Cl supérieur en 1 pour la plus part de nos échantillons (annexe II, tableau 4) pourrait être interpréter comme la libération de Na^+ à partir des réactions d'altération des minéraux silicatés (Meybeck 1987, in Aboubakar, 2012). En fait l'altération des minéraux silicatés tels que l'albite peut entrainer la libération du sodium selon la réaction suivante :



V.5.2. Le chlorure

Les teneurs en ions chlorure sont comprises entre 3,75 mg/l et 67,4 mg/l. La concentration la plus faible a été aussi enregistrée au niveau du fleuve Sénégal et la concentration maximale a été enregistrée dans la localité de Tuabou dans un puits situé à quelques mètres du forage. La valeur standard fixée par l'OMS pour la concentration en chlorure est 200 mg/l, aucuns résultats ne dépassent ce seuil (fig. 13).

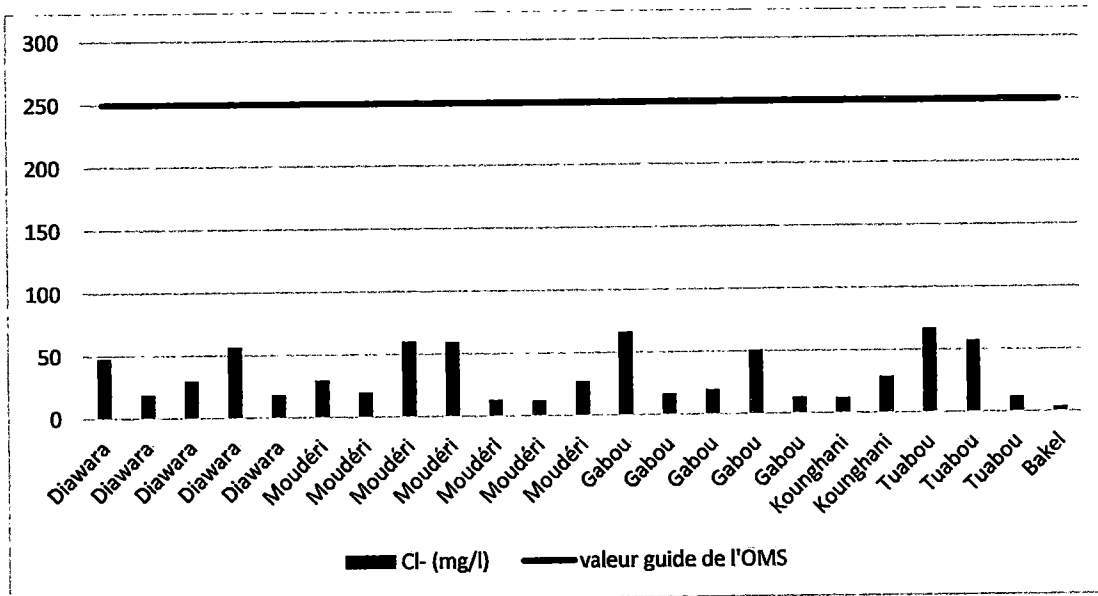


Figure 13 : Histogramme des concentrations en chlorure

V.5.3. Le bicarbonate

La teneur en ion bicarbonate varie de 24,4 mg/l à 445,3 mg/l. la valeur la plus faible a été enregistrée au niveau du fleuve Sénégal, et la plus élevée au niveau d'un forage à pompe manuelle captant les formations schisteuses du socle. Aucune valeur standard n'a été fixée par l'OMS pour les bicarbonates (fig. 14). La présence de bicarbonates dans l'eau lui donne une saveur agréable et ne présente aucun danger pour la santé (*in* Tendeng, 2002).

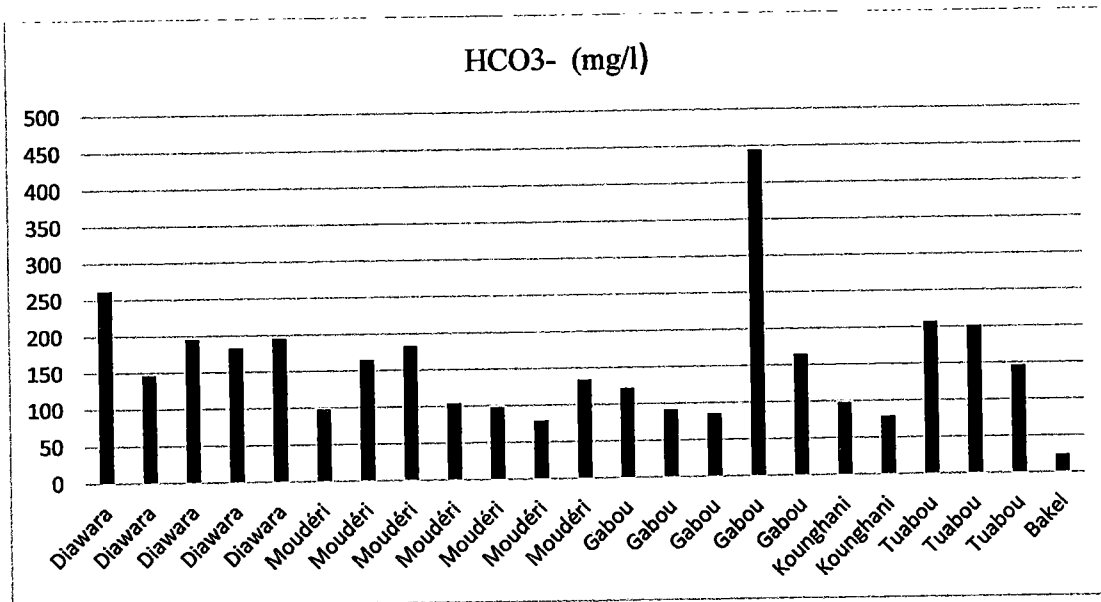


Fig. 14 : histogramme des concentrations en bicarbonate

Le milieu est très riche en bicarbonate. Dans la plus part des cas, les bicarbonates représentent 70 à 90% des anions (Depagne et moussu, 1967).

Si l'altération de ces minéraux silicatés est la source du sodium, l'anion dominant serait les bicarbonates (cas de notre zone d'étude). Ceci pourrait être dû à la réaction chimique s'effectuant entre les minéraux feldspathiques et l'acide carbonique en présence d'eau, et qui aboutit à la mise en solution de HCO_3^- (Lloyd et Heathcote, 1985 *In* Hassane, 2010).

V.5.4. Le calcium

La concentration des ions calcium est comprise entre 3,2 mg/l et 65,22 mg/l. La concentration la plus faible a été localisée au niveau du fleuve Sénégal et la plus élevée a été aussi localisée comme pour les bicarbonates au niveau d'un forage à pompe manuelle située dans la localité de Gabou. Aucune des concentrations ne dépasse la valeur standard conseillée par l'OMS (fig. 15).

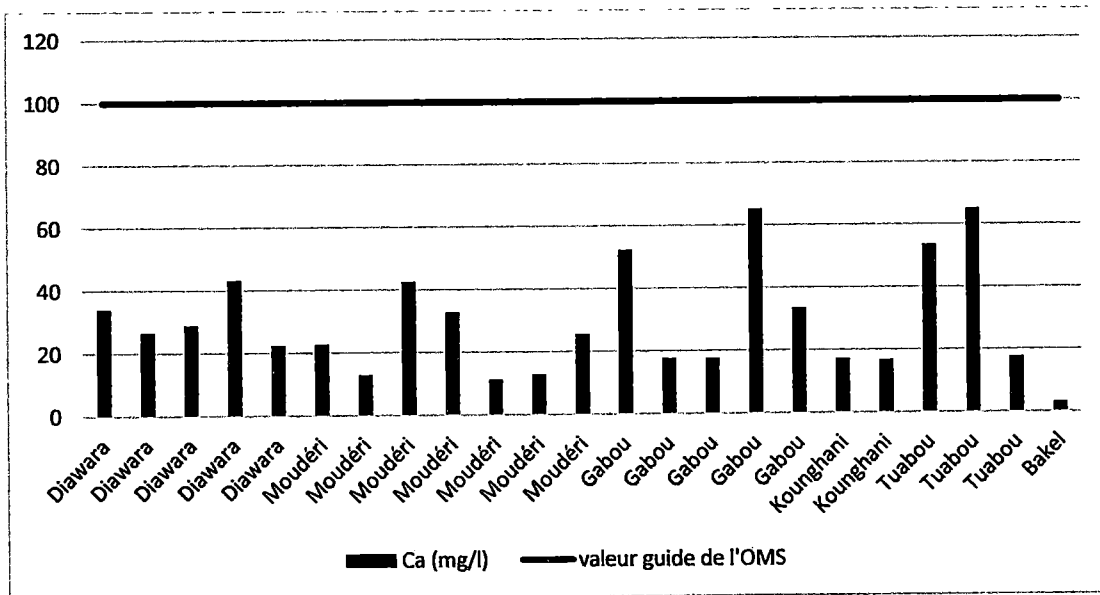


Figure 15 : Histogramme des concentrations en calcium

Le rapport calcium sur bicarbonate supérieur en 1 ($Ca^{2+}/HCO_3^- < 1$) dans la majorité de nos échantillons, indique que le milieu n'est pas trop riche en calcium. Par contre, on note dans certains points d'eau (cas du forage à pompe manuelle de Gabou), des concentrations en Ca assez élevées.

V.5.5. le Magnésium

Les teneurs en magnésium sont comprises entre 1,94 et 38,88 mg/L. la teneur la plus faible a été enregistrée au niveau du fleuve Sénégal et la plus forte au niveau du forage à pompe manuelle située dans la localité de Gabou. Le magnésium est aussi présente dans les roches sédimentaires et les roches cristallines, d'où sa présence dans les eaux souterraines.

La valeur standard conseillée par l'OMS pour le magnésium est de 50 mg/l, aucune de nos résultats ne dépasse cette valeur standard (fig.16).

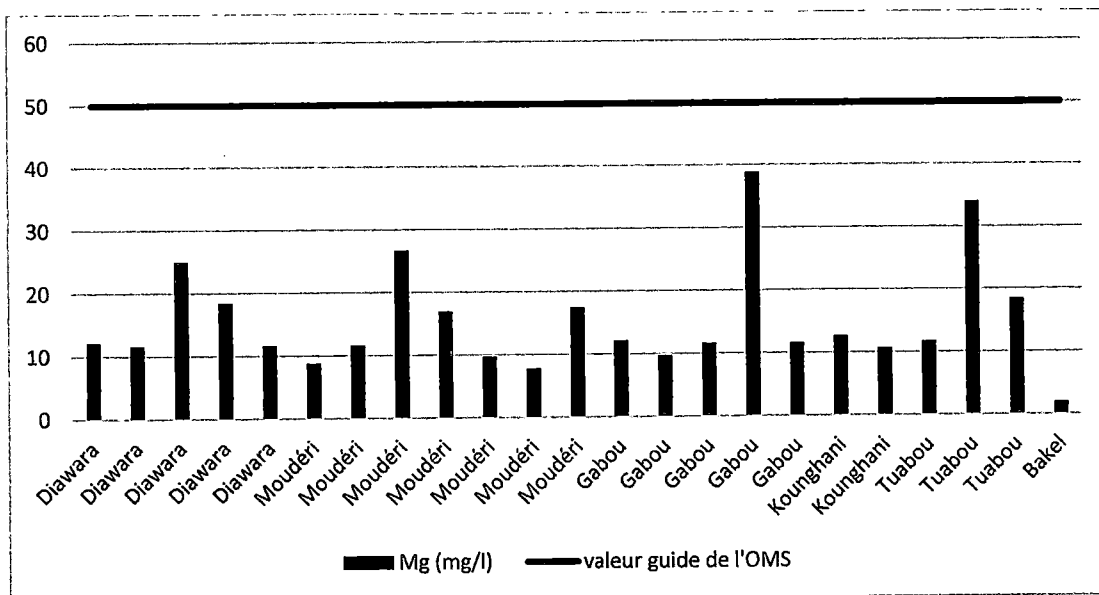


Figure 16 : Histogramme des concentrations en magnésium

V.5.6. Le sulfate

Les teneurs en ions sulfates sont comprises entre 0,32 mg/l et 39,32 mg/l. Comme pour tous les autres ions cités précédemment, la concentration la plus faible a été aussi enregistrée au niveau du fleuve, et la plus forte teneur dans la localité de Gabou au niveau du forage à pompe manuelle.

La présence de sulfate dans l'eau souterraine pourrait être due à la dissolution des minéraux argileux, ou une source de pollution si les teneurs dépassent la valeur standard conseillée par l'OMS. Celle-ci est évaluée à 250 mg/l, cependant, aucun de nos résultats ne dépassent cette valeur (fig. 17).

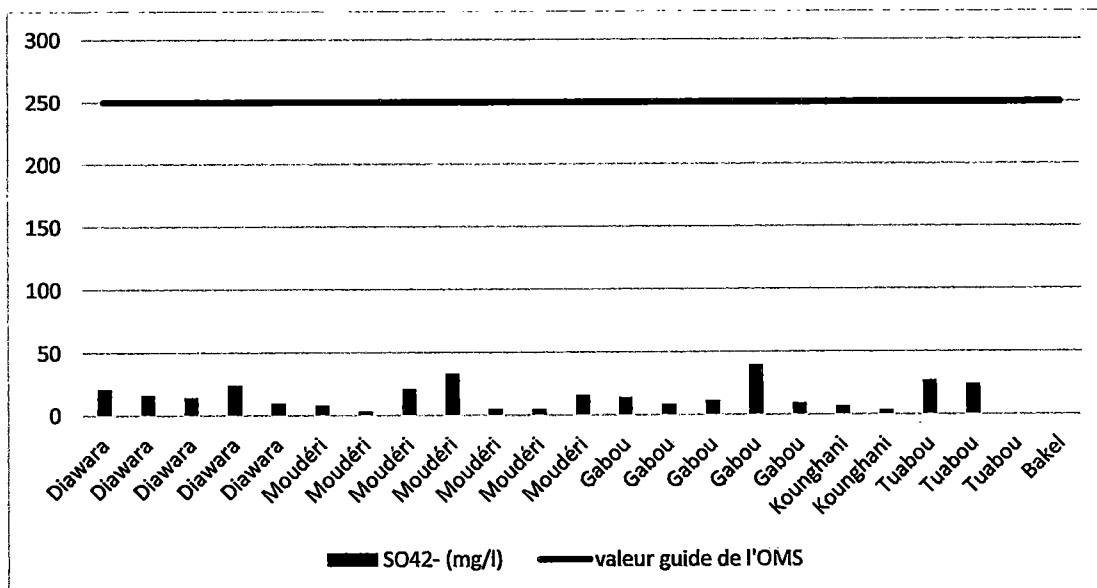


Figure 17 : Histogramme en concentration des sulfates

Le rapport SO_4/Cl^- (annexe II, tableau4), inférieur à 1 dans l'ensemble de nos échantillons indique la prédominance des chlorures vis-à-vis des sulfates. En outre, cette ration (SO_4/Cl^-) < 1 pourrait caractériser des eaux à salinité faible ou même très rare dans la zone.

V.4.7. Le potassium

Le potassium est présent dans l'eau qu'en faible proportion. Une concentration très élevée de ce dernier pourrait être considéré comme source de pollution.

Les teneurs en potassium oscillent entre 0,56 mg/l et 6,14 mg/l. la concentration la plus faible a été enregistrée dans la localité de Moudéri dans un puits situé à plusieurs mètres du fleuve, et la plus forte concentration a été localisée dans la localité de Tuabou dans un puits situé à quelques mètres du fleuve.

La valeur standard fixée par l'OMS pour l'eau potable est de 12 mg/l, tous les résultats obtenus après analyses ne dépassent pas cette norme (fig. 18).

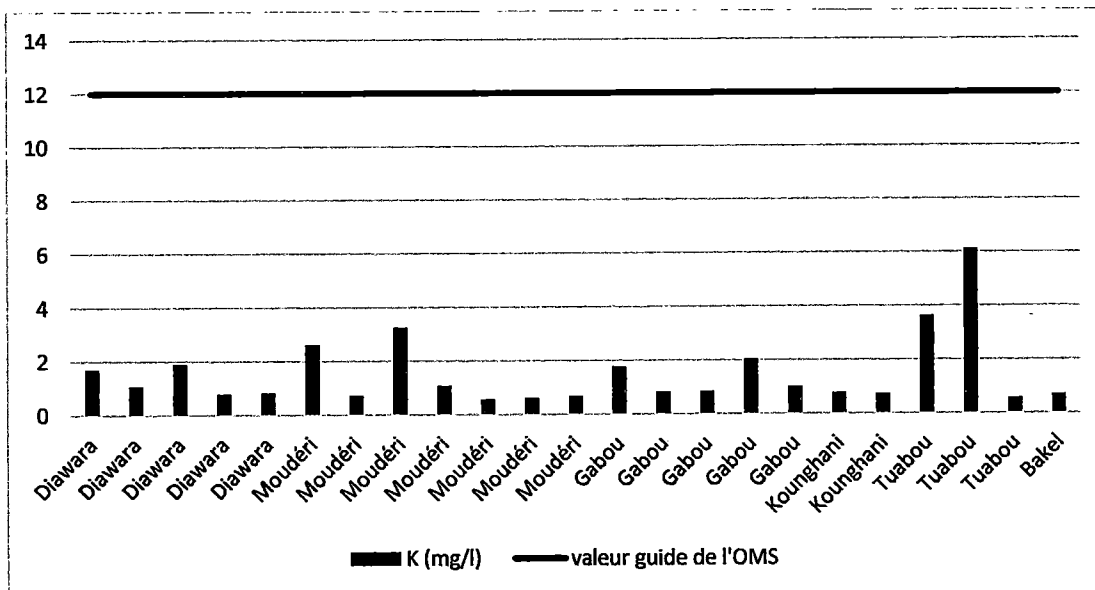


Figure 18 : Histogramme des concentrations en potassium

V.4. 7. Les nitrates

La présence de nitrate dans le Sénégal Oriental a été énoncée dans certaines études antérieures, parmi lesquelles, (J. Depagne, H. Mousson, 1967), (Camus et Debuisson, 1964), et récemment (Mall, 2009) avec des teneurs allant de 54 à 97,850 mg/L.

La teneur en nitrate oscille entre 0,55 mg/l et 170,6 mg/l. La concentration la plus faible teneur a été enregistrée au niveau du fleuve, et la plus forte concentration dans la localité de Tuabou dans un puits situé à quelques mètres du fleuve (fig. 19).

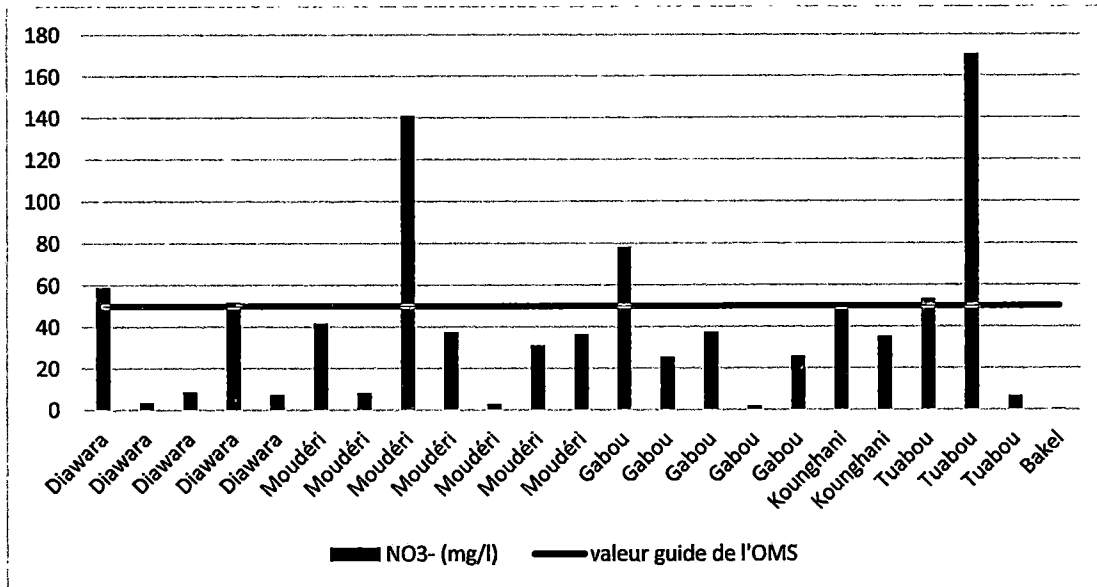


Figure 19 : Histogramme des concentrations en nitrate

Six points d'eau présentent des taux de nitrate dépassant la valeur standard conseillée par l'OMS. Le puits nommé Mamadou situé dans la localité de Gabou dans un champ présente un taux de nitrate assez élevé (78,14mg/l). Le puits nommé P1 Moribogou est un puits traditionnel situé dans la commune de Gabou (village de Moribougou), présente un taux de nitrate assez important (51,9mg/l).

Les autres puits (Amina Bathily, Koné, Mamadou Konaté, Diakité), situés dans les localités de Tuabou, de Moudéri et de Diawara présentent aussi des taux de nitrates assez élevés. Peu présents dans les eaux souterraines à l'état naturel, les nitrates constituent souvent un marqueur d'activité anthropique (agriculture, élevage...), (Mall, 2009). Comme dit plus haut les fosses septiques dans la zone de Bakel sont construites de manière précaire, en plus certains puits sont situés au niveau des champs. En effet, l'urine contient de l'ammoniac et l'urée (contenant de l'azote) qui peuvent rapidement oxydés en nitrate dans les sols. Ces derniers lessivés pendant la saison des pluies, s'infiltreront dans la nappe.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Le département de Bakel appartient au climat tropical semi-aride, il fait partie des zones les plus chaudes du Sénégal. Les données pluviométriques montrent une légère variation entre les années 1950 à 2001. Cependant à partir de 2001 jusqu'à 2014, la tendance montre une baisse considérable des pluies.

Les paramètres hydrodynamiques obtenus indiquent que ces aquifères sont caractérisés par une assez bonne transmissivité et une perméabilité moyenne à faible. Ces nappes alluviales sont productives. L'analyse des coupes lithologiques indiquent qu'elles sont très limitées dans la zone de Bakel à cause de la présence de socle qui occupe presque les 2/3 de la zone. La plus part des forages captent deux nappes superposées. Celles alluviales qui sont superficielles et captées entre les profondeurs de 20 à 25 m et les nappes du socle qui sont plus profondes captées vers 100 m ou plus. Ces nappes du socle sont contenues dans des fractures constituées de roche métamorphiques et qui sont peu productives.

La projection des données hydrochimiques sur le diagramme de Piper, a montré un faciès bicarbonaté mixte, un faciès bicarbonaté sodique et un faciès nitraté mixte. Le faciès bicarbonaté mixte domine largement dans la zone. Les rapports caractéristiques effectués ont pu montrer l'origine de la dominance des ions bicarbonatés et des ions sodium. Ainsi, le sodium pourrait provenir de l'hydrolyse des minéraux silicates tels que les albites et la présence de bicarbonates pourraient être dû à la réaction chimique s'effectuant entre les silicatés et l'acide carbonique en présence d'eau. Les résultats des analyses indiquent des eaux pratiquement douces. Le seul forage caractérisant une eau un peu salée se trouve dans la commune de Gabou captant un aquifère schisteux. Une pollution ponctuelle concernant les ions nitrates a été enregistrée dans la zone. Ces concentrations élevées en nitrate pourraient soit avoir une origine agricole ou provenir des latrines. Une analyse en coliformes fécaux des différents échantillons prélevés pourrait plus confirmer cette origine de la pollution due aux latrines.

La zone de Bakel est pratiquement dépourvue de données, aucune donnée piézométrique ni de donnée de nivellement n'a été enregistrée dans cette zone. Les principales mesures ont été faites au niveau des puits et dans certains forages. Cette absence de données nous a contraints à réaliser la carte piézométrique de la zone. En plus l'implantation de piézométries dans cette zone pourrait permettre de comprendre la fluctuation entre le fleuve et la nappe.

Les nappes alluviales demeurent les plus importantes dans notre zone d'étude, elles sont très accessibles, en plus leur exploitation s'avère moins coûteuse à cause de leur faible profondeur. Ces nappes participent aussi à la pérennité des eaux de surfaces (lac, fleuve).

Vue l'accroissement de la population, et les changements climatiques qui s'accroissent de plus en plus :

- Une gestion intégrée à long terme et de manière très efficace de ces nappes alluviales devrait être mise en vigueur.
- Une protection de ces nappes, pour éviter toute pollution anthropique est fortement nécessaire.
- Il est nécessaire de sensibiliser les populations sur la construction des fosses septiques, qui peut être une source de contamination potentielle de la nappe.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aboubakar, M.**, 2012. Caractérisation d'un système aquifère volcanique par approche couplée hydrogéochimique et modélisation numérique : Exemple de l'aquifère des basaltes de Dalha, sud-ouest de la République de Djibouti . Thèse doctorale, Faculté des Sciences Fondamentales appliquées, Université de Poitiers : 221p
- Audibert M (1970)** « Delta du fleuve Sénégal. Étude hydrogéologique. Projet hydro-agricole du bassin du fleuve Sénégal ». Tome III: hydrogéologie, Tome IV: drainabilité, Rapport Projet AFR/REG 61. FAO/OERS.
- Camus H. et Debuissou, J.** Etude hydrogéologiques des terrains anciens du Sénégal Oriental (campagne 1962-1963) (page 135), rapport présenté par le bureau de recherches géologiques et minières.
- Dabo M.** 2011. Tectonique et minéralisations aurifères dans les formations birimiennes de Frandi-Boboti, boutonnière de Kedougou-Kenieba, Sénégal. Tectonics. Université Rennes 1, 2011. French. <tel-00990789> : 207p
- Diagana A.** 1994. Etudes hydrogéologiques dans la vallée du Fleuve Sénégal de bakel à podor: Relations eaux de surface et eaux souterraines. Thèse doctorale, Université Cheikh Anta Diop de Dakar : 126p
- Diao S. M.** 1992. Etude des aquifères alluviaux de la vallée du fleuve Sénégal. Mémoire de D.E.A. de géologie appliquée mention: hydrogéologie, Université Cheikh Anta Diop : 71p.
- Dieng B.** 1999. Impacts des barrages de Diama Et Manantali sur les nappes de la vallée du fleuve Sénégal 8p
- Diouf S.** 1999. Hydrogéologie en zone de socle cristallin et cristallophyllien du Sénégal oriental : Application de la méthode électrique ID et 2D à la localisation et à la caractérisation des aquifères du batholite de Saraya et ses environs, thèse doctorale, Université Cheikh Anta Diop : 86p.
- Diaw M.** 2008. Approche hydrochimique et isotopique de la relation eau de surface/nappe et du mode de recharge dans l'estuaire et la basse vallée du fleuve Sénégal. Thèse de doctorat de 3^E Cycle en Géologie Appliquée: Mention Hydrogéologie : 193p.
- Diene M.** 1995. Etude hydrogéologique, hydrochimique et Isotopique de la nappe superficielle du Ferlo Septentrional (nord Sénégal).

- Depagne J., Mousson H., 1967.** Notice explicative de la carte hydrogéologique du Sénégal au 1/500000 et de la carte hydrochimique au 1/1000000 (BRGM, ministère de l'énergie et de l'hydraulique : 28p.
- Diop F. N, Dacosta H, Malou R, Akpo L. E, 2008.** Impacts des aménagements hydro-agricoles sur les ressources en eau du delta du fleuve Sénégal [visité en Juin 2015]. Disponible sur www.iwra.org/congress/2008/ressource/authors/abs670.
- DGPRES, 2006.** Contribution du point focal thématique Eaux souterraines du Sénégal aux Travaux de l'atelier eaux souterraines Prévu à Saint Louis.
- Fenelon Paul. H. Schoeller.** Les eaux souterraines : hydrologie dynamique et chimique ; recherche, exploitation et évaluation des ressources, Norois, 1965, vol. 48, n°1, p493_495. [Url:/web/revues/home/prescript/article/noroi_0029182x_1965_num_48_1_7270_t1_0493_00_00_2](http://web/revues/home/prescript/article/noroi_0029182x_1965_num_48_1_7270_t1_0493_00_00_2) Consulté le 15 septembre 2015.
- IRD, 2012.** Monographie hydrologique du bassin du fleuve Sénégal
- IRD, OMVS.** Impacts potentiels de la gestion des ouvrages et des eaux de surface du Fleuve Sénégal sur la DYNAMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES. Rapport de synthèse Version Provisoire1511211998.
- Guiguen N. et Lerique J., Janvier 1977.** Note sur l'étalonnage du Sénégal à Bakel à la suite de la campagne de mesures de 1974 et 1975. Centre OSTROM de Dakar B.P 1386 Dkr
- Hassane. A.B.2010.** Aquifères superficiels et profonds et pollution urbaine en Afrique : Cas de la communauté urbaine de Niamey (NIGER), l'Université Abdou Moumouni de Niamey, thèse de doctorat, Spécialité : Sciences de la Terre, Option : Hydrogéologie. P.170
- J. Archambault, 1960.** Les eaux souterraines de l'Afrique Occidentale : 137 p, P.31, P.15.
- Kane C. H. 2008.** Etude diagnostique pour la mise en place et la réhabilitation du réseau piézométrique dans le bassin du fleuve Sénégal. GEF/OMVS/SOE (TF N° 055192): 89P.
- Lloyd J. W., Heathcote J. A., (1985).** Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater. An introduction. Clarendon Press. Oxford. 296 pp.
- Mall I., 2009.** Contribution à l'étude hydrogéochimique en Zone de socle : cas du Sénégal oriental. Mémoire de diplôme d'études approfondies en géologie appliquée : mention hydrogéologie, Université Cheikh Anta Diop de Dakar : 47p.
- McDonald, A. Davies, J., Calow, R., and Chilton J., 2005.** Developing Groundwater. A guide for rural water supply. YIDG Publishing.
- Michel P, Sall M. (1984).** Dynamique des paysages et aménagement de la vallée alluviale du Sénégal, OSTROM, Congrès International de Géographie, 21, 89-109.

- Martin A., 1962**, Etude hydrogéologique de la région de Kédougou-Bakel (Sénégal Oriental-campagne)
- Meybeck, M., 1986**. Composition chimique des ruisseaux non pollués de France. Sci. Géol. Bull. 39, pp 3-77.
- Rochette C., Paris 1974**. Bassin du fleuve Sénégal, Monographies hydrologiques OSTROM N° 1. P 24.
- Tendeng, R., 2002**. Hydrochimie et risque de pollution de la nappe urbaine de la commune de Tambacounda, Mémoire de D.E.A de géologie appliquée, mention hydrogéologie, Université Cheikh Anta Diop : 63p.
- Sambou, S. (2004)**. Modèle statistique des hauteurs de pluies journalières en zone sahélienne: exemple du bassin amont du fleuve Sénégal / Frequency analysis of daily rainfall in the Sahelian area: case of the upstream basin of the Senegal River, *Hydrological Sciences Journal*, 49:1, 115-129, DOI: 10.1623/hysj.49.1.115.53989, Département de physique, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cheikh Anta Diop, Dakar, Sénégal. 17 : 115-129.
- Wuilleumier, A., Théveniaut, H., Mall, I. et Ndiaye, P.M., 2010**. 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, 99 P. (page, 44-45-46 47,).

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I : DONNEES HYDROCLIMATIQUES DE LA STATION DE BAKEL

Tableau 1 : Données pluviométriques de la station de Bakel en 2007.

Tableau 2 : Données d'évaporation bac et de piche de Bakel en 2014.

ANNEXE II : DONNEES PHYSICO-CHIMIQUE DE LA ZONE

Tableau 1 : Paramètres physico-chimiques.

Tableau 2 : Résultats des analyses chimiques en mg/l.

Tableau 3 : Résultats des analyses chimiques en meq/l avec la somme des cations et des anions.

Tableau 4 : Rapports caractéristiques de certains paramètres chimiques et la balance ionique.

ANNEXE I : DONNEES HYDROCLIMATIQUES DE LA STATION DE BAKEL

Tableau 1 : Données pluviométriques de la station de Bakel en 2007 (mm)

Année	Jan	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
2007	0	0	0	0	10	24,3	81,9	360,2	175,3	4	0,3	0

Tableau 2 : Données d'évaporation bac et de piche de Bakel en 2014 (en mm)

2014	jan	fév.	mars	avril	mai	juin	juil.	aout	sept	oct.	nov.	déc.
piche	257,6	283,1		348,3	342,2	338,3		92,9	103,6	164,1	221,6	273,2
bac	179,8	195,3	249,2	293,9	300,1	313,9	214,0	143,4	150,9	180,2	175,4	287,0

ANNEXE II : DONNEES PHYSICO-CHIMIQUE DE LA ZONE

Tableau 1 : Paramètres physico-chimiques.

Localités	long	lat.	Désignation	Types d'ouvrages	NS en m	CE	pH
Diawara	12,5438889	15,0211111	Koné	Puits	12,6	691	7,14
Diawara	12,5438889	15,0211111	Seydou Sow	Puits	12,6	326	6,8
Diawara	-12,5275	15,0213889	Karim Cissé	Puits	12,9	460	7,09
Diawara	12,5213889	15,0113889	9 8X 2	Forage	10,72	660	7
Diawara	-12,5275	15,0211111	Jakary Diallo	Puits	12,6	380	7,05
Moudéri	12,5922222	15,0561111	Boubacar Koné	Puits	10	326	6,8
Moudéri	12,5922222	15,0561111	Dramane Diallo	Puits	10,5	345	7,16
Moudéri	12,5936111	15,0569444	Diakité	Puits	11	756	6,78
Moudéri	12,5936111	15,0572222	Samba Ndiaye	Puits	11,3	494	7,13
Moudéri	12,5980556	15,0594444	Ousmane Sianta	Puits	10,8	206	7,06
Moudéri	12,6013889	15,0613889	Mouna Traoré	Puits	9,87	220	6,8
Moudéri	12,6013889	15,0613889	Maison du chef de village	Puits	11,6	393	6,96
Gabou	12,4077778	14,7175	Mamadou Barry	Puits	10,9	568	6,7

Gabou	12,4077778	-	14,7175	Djibi Fofana	Puits	9,6	241	6,55
Gabou	12,4077778	-	14,7175	Demblé	Puits	9,68	270	6,62
Gabou	12,4672222	-	14,8394444	Moribougou (village)	Pompe	13,43	957	7,5
Gabou	-12,4125	-	14,72083	FI	Forage		368	6,75
Koungaha ni	12,4411111	-	14,7505556	Traoré Kounda	Puits	12,1	262	6,93
Koungaha ni	12,4411111	-	14,7508333	Demblé Kounda	Puits	11,1	254	6,75
Tuabou	12,4686111	-	14,9727778	Mamadou konaté	Puits	12,3	676	6,99
Tuabou	12,4652778	-	14,9733333	Aminata Bathily	Puits	12,6	814	6,98
Tuabou	-12,465	-	14,9733333	Sokhna Camara	Puits	11,8	272	7,05
Bakel	12,4666667	-	14,9	FS	fleuve	11,71	47,2	7,19

Tableau 2 : Résultats des analyses chimiques en mg/l

NOMS	HCO3-	Cl-	SO42-	NO3-	Ca	Mg	Na	K
G. Demblé Kounda	79,3	28,79	3,65	35,35	16,86	10,69	14,52	0,74
D. Koné	262,3	47,81	20,69	58,94	34,08	12,15	93,38	1,7
T. Mamadou Konaté	207,5	67,4	26,88	53,34	53,61	11,72	58,72	3,64
M. Diakité	183	60,1	21,16	141,09	42,69	26,73	60,32	3,26
Fleuve Sénégal	24,4	3,75	0,32	0,55	3,2	1,94	3,15	0,71
M. Samba Ndiaye	103,7	59,6	33,44	37,46	32,76	17,01	32,72	0,99
D. Seydou Sow	146,4	18,86	16,27	3,34	26,5	11,66	21,17	1,09
M. Chef de village	134,2	27,32	16,19	36,4	25,6	17,50	20,27	0,67
M. Sianta	97,6	12,5	5,06	2,76	11,2	9,72	14,03	0,56
D. Bakary Diallo	195,2	18,43	9,56	7,3	22,4	11,66	37,65	0,83
M. Boubacar Koné	97,6	29,45	8,21	41,76	22,8	8,75	27,43	2,63
D. Karim Cissé	195,2	29,6	14,09	8,44	28,8	25,03	19,30	1,91
T. Sokhna Camara	146,4	11,8	0,41	6,56	17,6	18,47	6,29	0,57
M Mouna Traoré	79,3	11,77	4,81	31,19	12,81	7,78	12,01	0,61
G. Traoré Kounda (K)	97,6	12,05	6,56	48,2	17,25	12,64	13,98	0,78
M. Dramane Diallo	164,7	19,45	3,19	8,08	12,84	11,66	35,51	0,73
G. Puit Mamadou	122	66,73	13,97	78,14	52,4	12,15	39,15	1,78
G. Fofana	91,5	16,64	8,48	25,53	17,6	9,72	10,10	0,84
T. Amina Bathily	201,3	57,52	24,24	170,6	65,09	34,02	39,87	6,14
G. Forage	164,7	12,8	9,24	25,86	33,6	11,66	12,31	1,01
G. Pompe manuelle	445,3	51,1	39,32	1,76	65,22	38,88	62,51	2,04
Puit Demblé	85,4	19,67	11,39	37,3	17,56	11,66	14,70	0,86
P1 Moribougou	305	38,3	21,08	51,9	32	24,16	82,24	1,48

Tableau 3 : Résultats des analyses chimiques en meq/l avec la somme des cations et des anions

NOMS	HCO3-	Cl-	SO42-	NO3-	Ca	Mg	Na	K	ANIONS	CATIONS
									2,76	2,37
G. Demblé Kounda	1,3	0,81	0,08	0,57	0,843	0,88	0,63	0,02	7,03	6,81
D. Koné	4,3	1,35	0,43	0,95	1,704	1	4,06	0,04	6,72	6,29
T. Mamadou Konaté	3,402	1,90	0,56	0,86	2,681	0,9646	2,55	0,09	7,41	7,04
M. Diakité	3	1,69	0,44	2,28	2,135	2,2	2,62	0,08	0,52	0,48
Fleuve Sénégal	0,4	0,11	0,01	0,01	0,16	0,16	0,14	0,02	4,68	4,49
M. Samba Ndiaye	1,7	1,68	0,70	0,60	1,638	1,4	1,42	0,03	3,32	3,23
D. Seydou Sow	2,4	0,53	0,34	0,05	1,325	0,96	0,92	0,03	3,89	3,62
M. Chef de village	2,2	0,77	0,34	0,59	1,28	1,44	0,88	0,02	2,10	1,98
M. Sianta	1,6	0,35	0,11	0,04	0,56	0,8	0,61	0,01	4,04	3,74
D. Bakary Diallo	3,2	0,52	0,20	0,12	1,12	0,96	1,64	0,02	3,27	3,12
M. Boubacar Koné	1,6	0,83	0,17	0,67	1,14	0,72	1,19	0,07	4,46	4,39
D. Karim Cissé	3,2	0,83	0,29	0,14	1,44	2,06	0,84	0,05	2,85	2,69
T. Sokhna Camara	2,4	0,33	0,01	0,11	0,88	1,52	0,27	0,01	2,23	1,82
M Mouna Traoré	1,3	0,33	0,10	0,50	0,641	0,64	0,52	0,02	2,85	2,53
G. Traoré Kounda (K)	1,6	0,34	0,14	0,78	0,863	1,04	0,61	0,02	3,44	3,16
M. Dramane Diallo	2,7	0,55	0,07	0,13	0,642	0,96	1,54	0,02	5,43	5,37
G. Puit Mamadou	2	1,88	0,29	1,26	2,62	1	1,70	0,05	2,56	2,14
G. Fofana	1,5	0,47	0,18	0,41	0,88	0,8	0,44	0,02	8,18	7,95
T. Amina Bathily	3,3	1,62	0,51	2,75	3,255	2,8	1,73	0,16	3,67	3,20
G. Forage	2,7	0,36	0,19	0,42	1,68	0,96	0,54	0,03	9,59	9,23
G. Pompe manuelle	7,3	1,44	0,82	0,03	3,261	3,2	2,72	0,05	2,79	2,50
Puit Demblé	1,4	0,55	0,24	0,60	0,878	0,96	0,64	0,02	7,36	7,20
P1 Moribougou	5	1,08	0,44	0,84	1,6	1,9885	3,58	0,04		

Tableau 4 : Rapports hydrochimiques de certains éléments en meq/l et la balance ionique

NOMS	Balance ionique en %	Na/Cl	SO4/Cl	Ca/Cl
G. Demblé Kounda	-8	0,78	0,09	1
D. Koné	-2	3	0,32	1,26
T. Mamadou Konaté	-3	1,3	0,29	1,4
M. Diakité	-3	1,55	0,26	1,26
Fleuve Sénégal	-5	1,27	0,09	1,45
M. Samba Ndiaye	-2	0,84	0,42	0,96
D. Seydou Sow	-1	1,73	0,64	2,5
M. Chef de village	-4	1,14	0,44	1,66
M. Sianta	-3	1,17	0,31	1,6
D. Bakary Diallo	-4	3,14	0,38	2,15
M. Boubacar Koné	-2	1,43	0,2	1,37
D. Karim Cissé	1	1	0,35	1,73
T. Sokhna Camara	-3	0,82	0,03	2,67
M Mouna Traoré	-10	1,57	0,3	1,94
G. Traoré Kounda (K)	-6	1,79	0,41	0,52
M. Dramane Diallo	-4	2,8	0,13	1,17
G. Puit Mamadou	-1	0,9	0,15	1,39
G. Fofana	-9	0,94	0,38	1,87
T. Amina Bathily	-1	1,07	0,31	2
G. Forage	-7	1,5	0,53	4,67
G. Pompe manuelle	-2	1,89	0,57	2,26
Puit Demblé	-6	1,16	0,44	1,59
P1 Moribougou	-1	3,3	0,41	1,48