

Impact de la gestion du barrage de Diama et de l'irrigation  
sur la nappe alluviale dans le Delta du Fleuve Sénégal

## Dédicaces

Au nom d'**Allah**, le tout **Miséricordieux**, le très **Miséricordieux**

Louange à **Allah**, le Seigneur de l'Univers et je prie sur le sceau des prophètes, **Seydina Mouhamed**, que la bénédiction et le salut soit sur lui ainsi que ses compagnons et ses serviteurs

Je dédie ce travail :

A ma mère **Aminata Sarr** et mon père **Seydina Issa Laye Diop**. Merci pour tous les sacrifices que vous avez consentis pour assurer mon éducation et ma réussite. Que le tout Puissant vous garde aussi longtemps que possible auprès de vos enfants. Amine !

A mes chères sœurs **Manetoulaye Diop, Fama laye Diop, Amina et Adja**

A mes oncles et tantes ainsi que tous les membres de la famille Diop et Sarr pour leurs prières et leurs soutiens

A tous les promotionnaires de master de Géologie

## Remerciements

A l'entame de manuscrit, il me serait agréable d'exprimer ma profonde gratitude à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à sa réalisation

D'abord je témoigne ma profonde gratitude à Madame **Fatou Diop Ngom**, chef du département de la géologie et responsable du master hydrogéologie qui a accepté de m'encadrer dans un élan de générosité, et de disponibilité malgré ses lourdes charges académiques. Vous m'avez accueilli dans votre bureau et j'ai beaucoup appris à vos côtés. Mes remerciements vont aussi à l'endroit de **Monsieur Raymond Malou** : président du jury ; à **Monsieur Mathias Diédhiou** ; à **Monsieur Moustapha Diène**, membre du jury. J'associe ces remerciements à l'ensemble du personnel de la SAED, à **Monsieur Moustapha Lo**, mon maitre de stage et ingénieur hydrologue à la DAIH ,à **Mr Ndiaye** ,ingénieur hydrologue à la DAIH pour son soutien sans failles et aux techniciens de suivi piézométrique, **Monsieur Goudiaby**, **Monsieur Cissé** et **Monsieur Keita**

## TABLE DES MATIERES

DEDICACES .....	I
REMERCIEMENTS .....	II
LISTE DES FIGURES.....	III
LISTE DES TABLEAUX.....	IV
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS.....	VII
RESUME.....	VIII
INTRODUCTION.....	1
I PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	3
I-1 Cadre physique.....	3
I-2 Contexte climatique.....	4
I-2-1 Pluviométrie.....	4
I-2-2 Température.....	6
I-2-3 Evaporation .....	6
I-2-4 Humidité relative .....	7
I-2-5 Les vents.....	8
I -3 Pédologie.....	9
I-4 Contexte géomorphologique et hydrologique.....	11
I-4-1 La géomorphologie.....	11
I-4-2 Hydrologie.....	13
❖ Le réseau hydrographique.....	13
❖ Le régime hydrologique du fleuve.....	16
❖ Evolution de la côte du fleuve après la mise en service du barrage à Diama amont.....	17
I-5 Contexte géologique et hydrogéologique.....	18

I-5-1 Le contexte géologique .....	18
❖ Cadre général.....	18
❖ Litho stratigraphie.....	20
I-5-2 Contexte hydrogéologique.....	24
❖ Le système aquifère profond.....	24
❖ Le système aquifère superficiel.....	25
➤ L'aquifère alluvial superficiel.....	26
➤ Les paramètres hydrodynamiques de la nappe alluviale du DFS.....	27
<b>II Matériels et méthodes.....</b>	<b>29</b>
II-1Acquisition des données.....	29
II-2 Critique des données .....	29
II-3 Traitement des données .....	29
II-4 Répartition des ouvrages.....	30
<b>III RESULTATS ET DISCUSSIONS .....</b>	<b>31</b>
III-1 Relation eaux de surface/ eaux souterraines.....	31
❖ Evolution du niveau piézométrique de la nappe en zones proches d'un cours d'eau.....	31
❖ Evolution du niveau piézométrique de la nappe en zones éloignées d'un cours d'eau .....	33
III-2 Impact de l'irrigation sur le fonctionnement hydrodynamique de la nappe.....	35
➤ Impact de la riziculture sur la recharge de la nappe.....	36
➤ Impact des autres cultures irriguées sur la recharge de la nappe.....	37
III-3 Relations entre nappes.....	38
CONCLUSION GENERALE ET RECOMMADATIONS.....	40
BIBLIOGRAPHIE.....	42
ANNEXES.....	46

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte de localisation du delta du fleuve Sénégal (Gning, 2015).....	3
Figure 2 : Pluviométrie moyenne mensuelle de Saint-Louis de 1987 -2017.....	5
Figure 3 : pluviométrie annuelle à la station de Saint-Louis de 1987 à 2017... ..	5
Figure 4 : Températures moyennes mensuelles de la station de Saint-Louis 1987-2016.....	6
Figure 5 : Moyennes mensuelles de l'humidité relative à la station de Saint-Louis de 1991 à 2010.....	7
Figure 6 : Evaporation moyenne mensuelle à la station de Saint-Louis de 1987 à 2016.....	8
Figure 7 : Principales unités géomorphologiques du delta du fleuve Sénégal (Deckers et al, 1996 modifiée in Gning, 2015).....	11
Figure 8 : Coupe schématique transversale des terrains de la vallée du fleuve Sénégal (Cissé, 2008).....	13
Figure 9 : Carte du bassin du fleuve Sénégal (Ba, 2013) .....	14
Figure 10: Carte du réseau hydrographique du Delta du fleuve Sénégal (Diaw, 2008).....	16
Figure 11 : Régime hydrologique du fleuve à Richard-Toll avant et après barrage .....	17
Figure 12 : Evolution du plan d'eau du fleuve après la mise en service du barrage .....	18
Figure 13: La transgression du Nouakchottien à son maximum en 5500 ans BP (Cissé, 2011).....	19
Figure 14: Carte géologique du delta du fleuve Sénégal (Cissé, 2008).....	24
Figure 15: Coupe schématique de variation du système aquifère dans la vallée (Gning, 2015) .....	26
Figure 16: Schéma des aquifères du Delta (Diaw, 2008).....	27
Figure 17 : Carte de localisation des piézomètres .....	30
Figure 18 : Relation nappe / cours d'eau.....	32
Figure 19 : Evolution annuelle du niveau de la nappe en parallèle avec la hauteur du fleuve..	33

Figure 20 : Fluctuations de la nappe en parallèle avec la pluviométrie et le niveau du fleuve au piézomètre GA0002.....34

Figure 21: Fluctuations de la nappe en parallèle avec la pluviométrie et le niveau du fleuve au piézomètre GA0120.....35

Figure 22 : Fluctuations de la nappe au niveau du piézomètre GA0054 en parallèle avec les précipitations.....37

Figure 23 : Fluctuations de la nappe en parallèle avec les précipitations mesurées au GA0071 et GA0072.....38

Figure 24 : Relations entre nappes.....39

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1 : Valeurs des paramètres hydrodynamiques de la nappe alluviale du DFS (Ngom, 2013) .....28

Tableau 2 : Caractéristiques des piézomètres du groupe 1.....31

Tableau 3 : Caractéristiques des piézomètres du groupe 2.....34

Tableau 4 : Caractéristiques des piézomètres du groupe 2.....36

## **LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS**

**ANACIM** : Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie du Sénégal

**AHA** : Aménagement Hydro-agricole

**BDD** : Base De Données

**BRGM** : Bureau de Recherche pour la Géologie Minière

**CDA** : Centre de Documentation et d'Archivage

**DAIH** : Direction des Aménagements et Infrastructures Hydroagricoles

**DFS** : Delta du Fleuve Sénégal

**EQUESEN** : Environnement et Qualités des Eaux du fleuve Sénégal

**FIT** : Front Inter Tropical

**O.M.V.S** : Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Sénégal

**PIP** : Périmètres Irrigués Privés

**PIV** : Périmètres Irrigués Villageois

**SAED** : Société Nationale d'Aménagement et d'Exploitation des Terres du Delta du Fleuve Sénégal et des Vallées du Fleuve Sénégal et de la Falémé.

**SEDAGRI** : Société d'Études et de Développement Agricoles

**USAID**: US Agency for International Development

## RESUME

Le delta du fleuve Sénégal est situé au Nord-Ouest du Sénégal dans la zone nord sahélienne. Il a connu, durant ces dernières années, d'importants changements d'origine naturelle (la sécheresse) et anthropique avec l'édification des infrastructures hydrauliques. En effet la sécheresse installée au Sahel au tour des années 70 a fortement réduit la disponibilité des eaux douces et par conséquent la production agricole. Pour parvenir à une maîtrise totale de l'eau, des aménagements hydro agricoles ont été érigés par l'OMVS (Organisation pour la Mise en Valeur du fleuve Sénégal) dans le bassin du fleuve. Le barrage anti sel de Diama mis en service en 1986 dans le delta, a donné un nouvel essor à l'agriculture irriguée en augmentant les disponibilités en eau de surface durant toute l'année. Cependant l'augmentation des ressources en eau combinée à l'intensification agricole ont eu des conséquences sur la dynamique de la nappe alluviale. Ce travail se propose comme objectif principal d'étudier les relations eaux de surface/ eaux souterraines dans ce contexte particulier d'irrigation et de gestion artificielle du fleuve.

L'étude piézométrique a montré que la nappe alluviale subit l'influence de plusieurs facteurs :

- La gestion du fleuve entraine un rehaussement significatif de la nappe dont l'ampleur varie par rapport à la distance nappe/cours d'eau
- La pratique de l'irrigation particulièrement la riziculture contribue à la recharge de la nappe dont le niveau piézométrique peut passer de 0,9 m à 2,9 m durant les périodes de culture
- Dans les zones éloignées des cours d'eau et des périmètres irrigués, la nappe est tributaire des variations saisonnières. Elle se recharge par infiltration des eaux de pluie et se décharge par évaporation en saison sèche

Mots clés : nappe alluviale, delta du fleuve Sénégal, cours d'eau, irrigation, riziculture

## INTRODUCTION GENERALE

La péjoration climatique qui s'est installée au Sahel depuis la fin des années 70 a eu comme corollaire une baisse de la production agricole. Face à cette situation, un vaste programme d'aménagements hydro agricoles a été entrepris par l'OMVS (Organisation pour la Mise en Valeur du Fleuve Sénégal) sur le cours d'eau du fleuve Sénégal. Ce programme se fixe pour objectif principal la maîtrise de l'eau dans le bassin du fleuve en vue d'un développement durable. Le barrage anti-sel de Diama mis en service en 1986 a pour vocation d'empêcher l'intrusion marine dans le delta du fleuve Sénégal. La gestion de ce barrage a permis une meilleure maîtrise du régime du fleuve avec une possibilité d'irrigation durant toute l'année. Actuellement on estime à 85 000 ha les superficies cultivées par irrigation (SAED, 2012). Ceci en fait la principale zone d'irrigation de la vallée avec 70% de la superficie des aménagements.

Ainsi, cet ouvrage en augmentant les disponibilités en eau douce dans le delta, a modifié le processus naturel de recharge de la nappe. La recharge de la nappe se faisait avant la mise en place des aménagements, à partir des cours d'eau, des marigots et des dépressions naturelles qui se remplissaient pendant l'hivernage (Ngom, 2008). Actuellement, ces zones de recharge naturelles ont été modifiées par l'action anthropique avec la création des périmètres irrigués, l'endiguement du fleuve et le relèvement du niveau des eaux de surface (SAED, 1998 ; Ngom, 2008).

Dans le cadre de cette étude, nous avons effectué un stage de quatre mois à la Société Nationale d'Exploitation des Terres du Delta du Fleuve Sénégal et des Vallées du fleuve Sénégal et de la Falémé (SAED) ce qui nous a permis d'exploiter la base de données piézométriques.

Face aux modifications d'origine anthropique avec la mise en service du barrage de Diama et l'extension des aménagements hydroagricoles, il nous a été proposé d'apporter notre contribution à l'étude du fonctionnement hydrodynamique de la nappe.

L'objectif principal de cette présente étude est de mieux comprendre les mécanismes d'interaction entre la nappe alluviale et les eaux de surface (eaux d'irrigation, eaux de pluie et cours d'eau). Cet objectif principal est soutenu par plusieurs objectifs spécifiques qui sont :

DIOP FATOU LAYE  
MEMOIRE MASTER II HYDROGEOLOGIE

- D'analyser le comportement hydrodynamique de la nappe
- De comprendre le fonctionnement de la nappe sous irrigation
- De mettre en évidence les mécanismes d'échanges hydrauliques entre le fleuve et la nappe suite à la mise en service du barrage

Pour se faire la première partie de cette étude est consacrée à la présentation générale de la zone d'étude; la deuxième partie décrit les matériels et méthodes utilisés et la troisième partie présente les résultats et discussions.

## **I Présentation de la zone d'étude**

### **I-1 Cadre physique**

Le Delta du fleuve Sénégal est circonscrit entre les latitudes 14°4 et 16° nord et les longitudes 15°30 et 16°30 Ouest. C'est une entité géographique de forme triangulaire composée du Walo et du Diéri. Le Walo est une unité hydro morphologique du Delta du Fleuve Sénégal (SAED, 1997). C'est la partie autrefois inondée par la crue. Le Diéri est la partie exondée, jamais atteinte par la crue. Le delta couvre une superficie de 4343 Km<sup>2</sup> et s'étend sur une longueur de 250 km de Richard Toll à Saint-Louis dont les trois quarts se situent en rive gauche (Cissé, 2008). Le DFS constitue un hydro- système complexe qui met en rapport plusieurs éléments dont les plus importants sont : l'Océan Atlantique, les cours d'eau (le fleuve Sénégal, ses affluents et défluent), les aménagements agricoles, les dépressions de stockage des eaux de drainage et la nappe alluviale dont la profondeur moyenne est à deux mètres sous la surface du sol (Gning, 2015). Il se présente sous forme d'une vaste plaine basse limitée au Nord par le fleuve Sénégal à l'Ouest par l'Océan Atlantique, à l'Est par le système du Lac de Guiers et au Sud par la grande région désertique du Ferlo (Figure 1). L'altitude maximale du Delta est de 6 mètres (Mean, 2011)

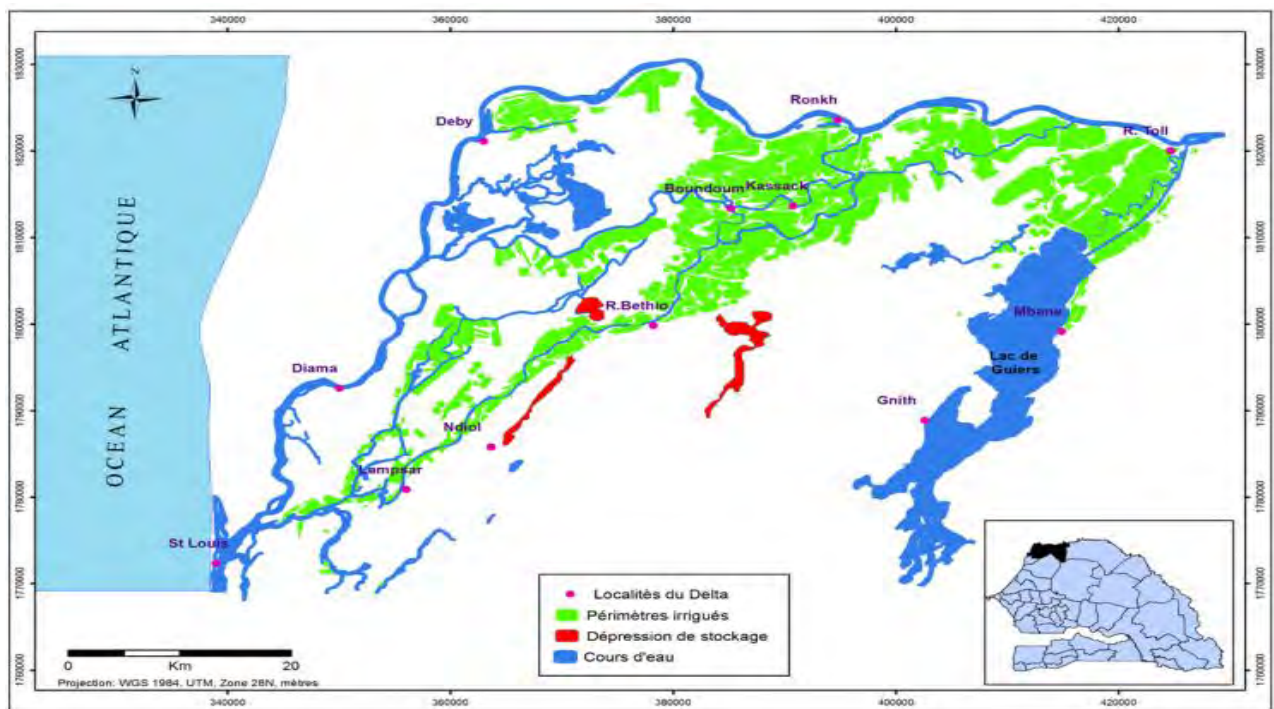


Figure 1 : carte de localisation du delta du fleuve Sénégal (in Gning, 2015)

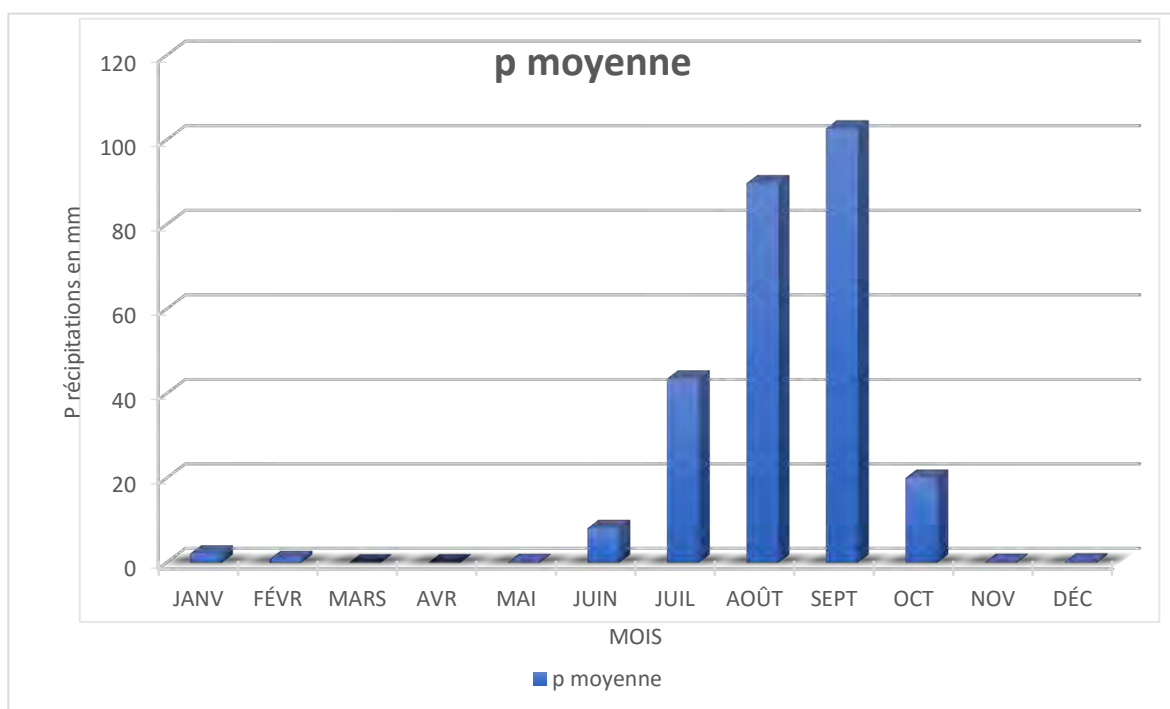
## I-2 Contexte climatique

Le Sénégal a un climat de type soudano-sahélien, caractérisé par l'alternance d'une saison sèche allant de novembre à mai et d'une saison des pluies de juin à octobre. Le maximum de pluviométrie se situe en août et septembre (Malou et al, 2004 in Gning, 2015). Ainsi en montant du Sud vers le Nord, on note successivement la présence de diverses zones climatiques : le climat guinéen ou sub -équatorial, le climat soudanien et le climat sahélien (Bonneau, 2001).

Le delta du fleuve Sénégal appartient au domaine nord sahélien et il est compris entre les isohyètes 100 et 300 mm (Cissé, 2008). A Saint-Louis, la proximité de l'océan permet de définir un climat régional limité à la zone côtière dit sub canarien (Ngom, 2013). Les données de la station de Saint Louis ont été utilisées pour analyser les différents paramètres climatiques. Ces données proviennent de l'Agence Nationale de l'Aviation Civile et de la Météorologie (ANACIM).

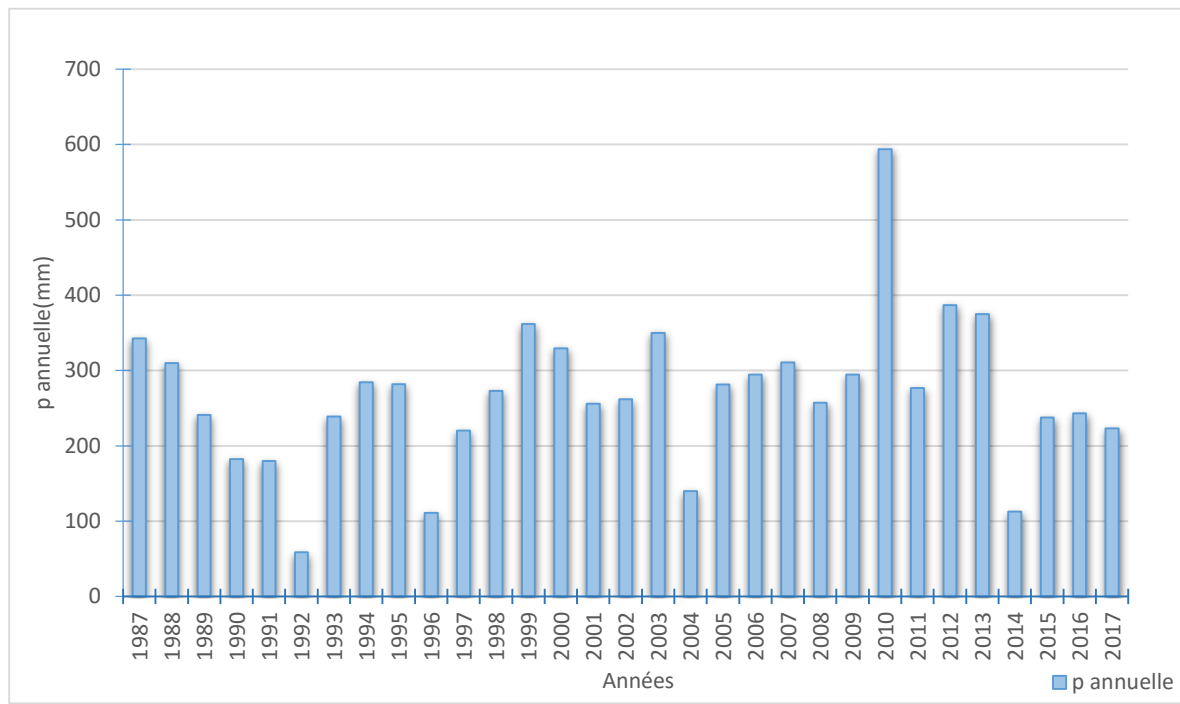
### I-2-1 Pluviométrie

La figure 2 présente la pluviométrie moyenne mensuelle de Saint-Louis sur la période de 1987 à 2017. L'analyse de cette figure nous a permis de mettre en évidence deux saisons distinctes : la saison des pluies qui va de juin à octobre avec un maximum au mois de septembre (105mm) et la saison sèche qui s'installe de novembre en mai. Les pluies enregistrées aux mois de juin et d'octobre sont faibles contrairement aux mois d'août et de septembre qui sont les plus pluvieux (figure 2). Selon Gning 2015, l'alternance entre les deux saisons est due aux mouvements du Front Inter Tropical (FIT) qui dès le mois de juin, sous l'effet de la dépression continentale centrée sur le Sahara, migre vers le nord et permet l'installation du flux de Mousson issu de l'anticyclone de Saint Hélène. Des pluies hors saison sont observées au mois de janvier et participent très faiblement à l'apport pluviométrique 1%.



**Figure 2 : Pluviométrie moyenne mensuelle de Saint-Louis de 1987 -2017**

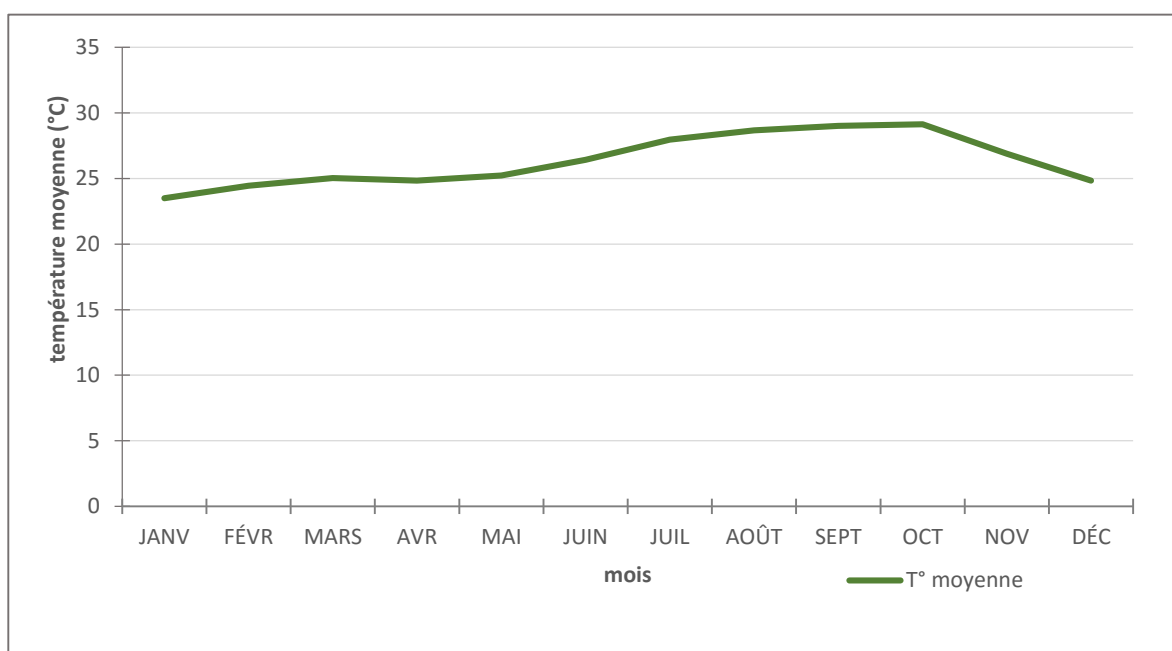
L'analyse de la pluviométrie interannuelle montre une irrégularité très importante et une pluviométrie annuelle généralement inférieure à 400 mm (figure 3). Le maximum des précipitations est enregistré en 2010 avec 593.6 mm et le minimum en 1992 avec 59.6mm.



**Figure 3 : pluviométrie annuelle à la station de Saint-Louis de 1987 à 2017**

## I-2-2 Température

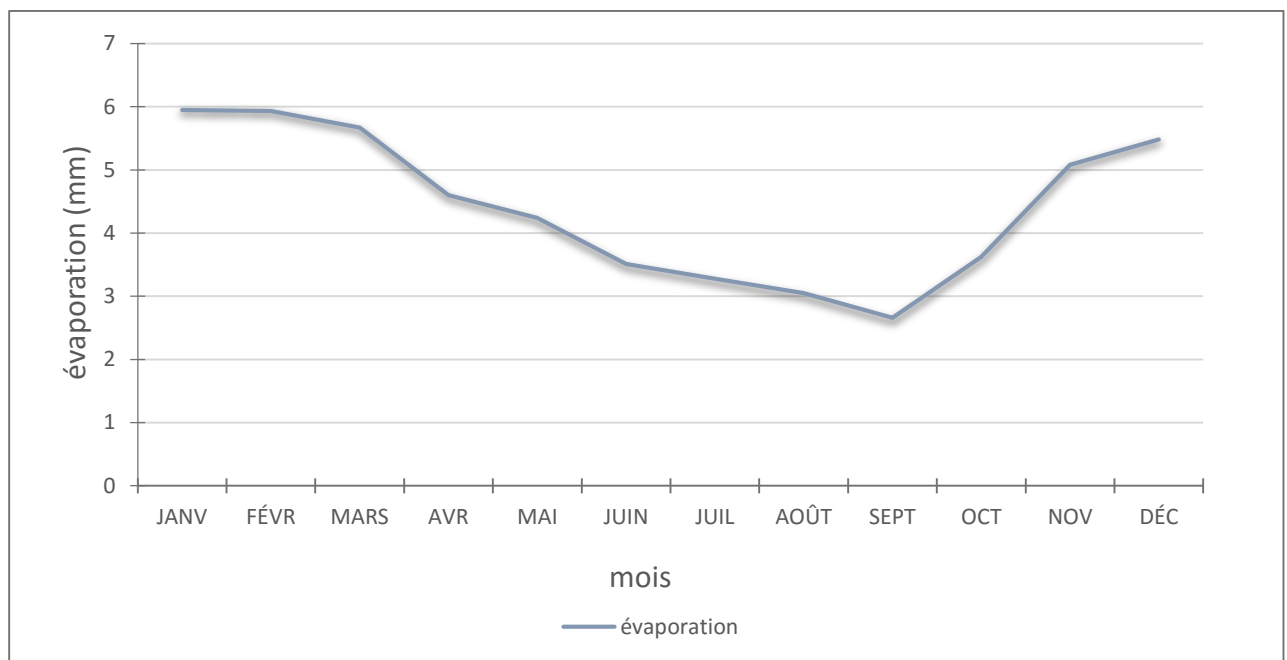
La figure 4 représente l'évolution des températures moyennes mensuelles à la station de Saint-Louis de 1987-2016. Les données thermiques enregistrées sont inférieures à 30°. La période la plus chaude est comprise entre juin et octobre (hivernage) avec des maxima de 29.14° au mois d'octobre et des minimas pendant la saison sèche (23.49 °au mois de janvier) soit une amplitude thermique d'environ 6°. Selon Diaw (2008), ces températures sont adoucies par l'influence océanique et à la fraîcheur des alizés maritimes dans les régions côtières.



**Figure 4 : Températures moyennes mensuelles à la station de Saint-Louis 1987-2016**

### I-2-3 Evaporation

L'évaporation est un phénomène physique de perte d'eau sous forme de vapeur. Elle est mesurée à l'aide d'un évaporamètre Piche (Seye, 2005). Les valeurs minimales sont observées pendant la saison des pluies entre juin et octobre en raison de la baisse de l'insolation et de l'humidité élevée de l'air. L'évaporation atteint son intensité maximale pendant la période sèche entre les mois de novembre à mai dont 5.95 mm au mois de janvier (figure 5) à cause de l'inexistence des précipitations et des températures élevées.

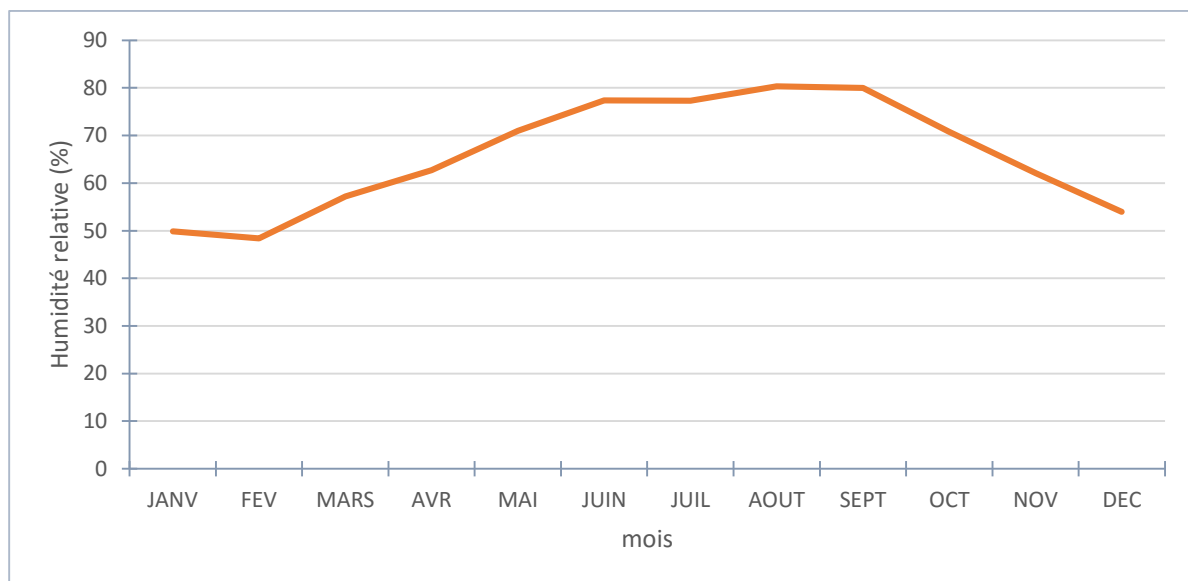


**Figure 5 : Evaporation moyenne mensuelle à la station de Saint-Louis de 1987 à 2016**

## I-2-4 Humidité relative

Dans le delta du fleuve Sénégal, l'évolution de l'humidité relative est liée au régime des vents et à la pluviométrie. A Saint-Louis, l'évolution générale de l'humidité relative est liée aux masses d'air, à leurs déplacements et elle est influencée par la proximité de l'océan. L'hygrométrie augmente avec la remontée du Front Intertropical, et régresse avec l'arrêt des précipitations.

La figure 6 présente l'évolution de la moyenne mensuelle de l'humidité relative sur la période de 1987 à 2003 à la station de Saint-Louis. Les valeurs de l'humidité relative les plus importantes sont enregistrées durant la saison des pluies avec un maximum au mois de Septembre (82%) et les valeurs les plus faibles en saison sèche avec un minimum au mois de janvier (46%).



**Figure 6 : moyennes mensuelles de l'humidité relative à la station de Saint-Louis de 1987 à 2003**

### **I-2-5 Les vents**

Dans le Delta du Fleuve Sénégal, trois types de vents circulent selon le cycle de saisons :

-L'Harmattan est le vent dominant pendant la saison sèche chaude (mars –mai). Ce vent de direction nord-ouest est caractérisé par une grande sécheresse liée à son parcours continental et par des amplitudes thermiques élevées. Sa vitesse dans le delta dépasse 31km/h en saison sèche.

-L'Alizé maritime issu de l'anticyclone des Açores, souffle de novembre à février pendant la saison sèche froide. Ce vent frais et humide rafraîchit l'atmosphère et réduit l'évaporation. Il provoque un abaissement de la température, du brouillard, de la rosée cependant il s'assèche rapidement vers l'intérieur

-La mousson : C'est un vent chaud et humide de juin à octobre provenant de l'Anticyclone Sainte Hélène. En été boréal alors que le Front Inter Tropical (FIT) occupe sa position la plus méridionale, il apparait dans le Sahara une dépression thermique du fait de la position zénithale du Soleil. L'anticyclone de Sainte Hélène très renforcée du fait de la vigueur de l'hiver austral repousse vers le nord l'anticyclone des Açores alors affaibli. On assiste à une inversion de la circulation aérienne et le FIT est repoussé progressivement vers le nord. La mousson

s'installe dans la zone tropicale avec les premières gouttes de pluies au mois de juin. En aout, le FIT occupe sa position la plus septentrionale dépassant le 20 ème parallèle, la saison pluvieuse bat son plein dans tout le pays. En septembre, ce front commence à régresser vers le sud ; dès le mois de novembre se termine la saison pluvieuse dans tout le delta. Le déplacement rapide du FIT du nord au sud explique la courte saison pluvieuse que connaît la basse vallée du fleuve (Cissé, 2008).

### **I-3 Pédologie**

Le delta du fleuve Sénégal est caractérisé par des sols dont les roches mères sont constituées d'un mélange en proportion variable d'argile, de limon et de sable. Ces roches sont surtout influencées par les conditions de dépôts qui dépendent à leur tour de la topographie. En raison des conditions particulières caractéristiques de la vallée et du delta on retrouve surtout les vertisols, les sols hydromorphes et les sols halomorphes (Michel, 1973)

#### ➤ Les vertisols

Ils se forment généralement dans les zones où prédominent les roches basiques (Michel, 1973). Ces sols sont généralement de couleur foncée du fait de leurs teneurs en matières organiques. Leur texture est argileuse avec plus de 35% d'argile le plus souvent gonflant. Ils se rencontrent dans les cuvettes, les petites levées et exceptionnellement sur les parties basses fluvio-deltaïques. Ils sont marqués par l'alternance de périodes humides et sèches très tranchées. Les variations brutales d'imbibition et de dessiccation leurs confèrent des caractères particuliers, un aspect craquelé par un réseau de fentes de dessiccation assez profondes en saison sèche (Ndiaye, 2004)

#### ➤ Les sols hydromorphes

Ce sont des sols dont l'évolution est dominée par la présence dans le profil d'un excès d'eau par la suite d'un engorgement temporaire ou permanent de surface, de profondeur ou par suite de la présence ou de la remontée de la nappe phréatique. Ces sols présentent plusieurs variétés dont les principales sont les sols hydromorphes bruns, les sols de vallée et les sols de mangrove (Ndiaye, 2004). Dans le delta, ils se localisent essentiellement dans les cuvettes de décantation argileuse ou d'inondation. Ces sols se caractérisent par une texture à dominante

argileuse, une structure grumeleuse en surface, une porosité faible, une ferruginisation en tâches brun rougeâtres ou parfois en concrétions indurées (Kane, 1997).

➤ Les sols halomorphes

Ils se caractérisent par leur salinité et/ou par leur alcalinité. Ils ont une évolution dominée par la présence de sels solubles (SEDAGRI, 1973) on distingue :

-Les sols halomorphes à structure non dégradée présentant en surface une croûte saline blanche ou jaunâtre. Ils ne portent aucune végétation ;

-Les sols halomorphes à structure dégradée, ces sols salés à alcalis comprennent 30% de sols très salés, 40% de sols moyennement salés et 30% de sols peu salés.

La structure particulière entretenue par la floculation des argiles et des limons en présence du sel fait que ces types de sols sont plus perméables. Dans le delta, ils sont présents dans les cuvettes de décantation et les levées fluvio-deltaïques au nord-est de Ross-Béthio et autour du parc de Djoudj (Faye, 1996).

➤ Autre classification des sols

Le facteur essentiel de la formation des sols dans le delta et la vallée est la durée et la fréquence de l'inondation par la crue (VAN LAVIEREN et VAN WETTEN, 1988). On distingue plusieurs types de sols classés selon leurs terminologies vernaculaires (Kane, 1997 in Cissé, 2011)

-Les sols hollaldé : ils constituent 36% du potentiel irrigable, et contiennent 50 à 75% d'argile formés par l'accumulation des dépôts fluviaux lors de la décantation des eaux de crue. Ils sont favorables à la riziculture

- Les faux hollaldé : ce sont des sols argilo-limoneux renfermant 10 à 35% d'argile qu'on rencontre principalement dans les levées fluvio-deltaïques. Ce sont les sols hydromorphes peu évolués. La texture est moyenne ou équilibrée ainsi que la teneur en matière organique, la fertilité et la perméabilité. Ils constituent 31 % du potentiel irrigable

- Les fondé : on les retrouve sur les bourrelets de berge. Ce sont des sols limoneux peu évolués d'apports hydromorphes. Ils sont favorables à toutes les cultures sauf le riz ;

Les falos: ce sont des talus du lit mineur du fleuve et de ces défluent situés en bordure du fleuve où sont pratiquées très localement les cultures maraîchères ;

Les diacrés: ils se localisent sur les levées subactuelles constituant les bourrelets recouverts par les crues moyennes à fortes. Ces sols sont rarement cultivés

La figure ci-dessous représente la coupe schématique transversale des terrains de la vallée du fleuve Sénégal

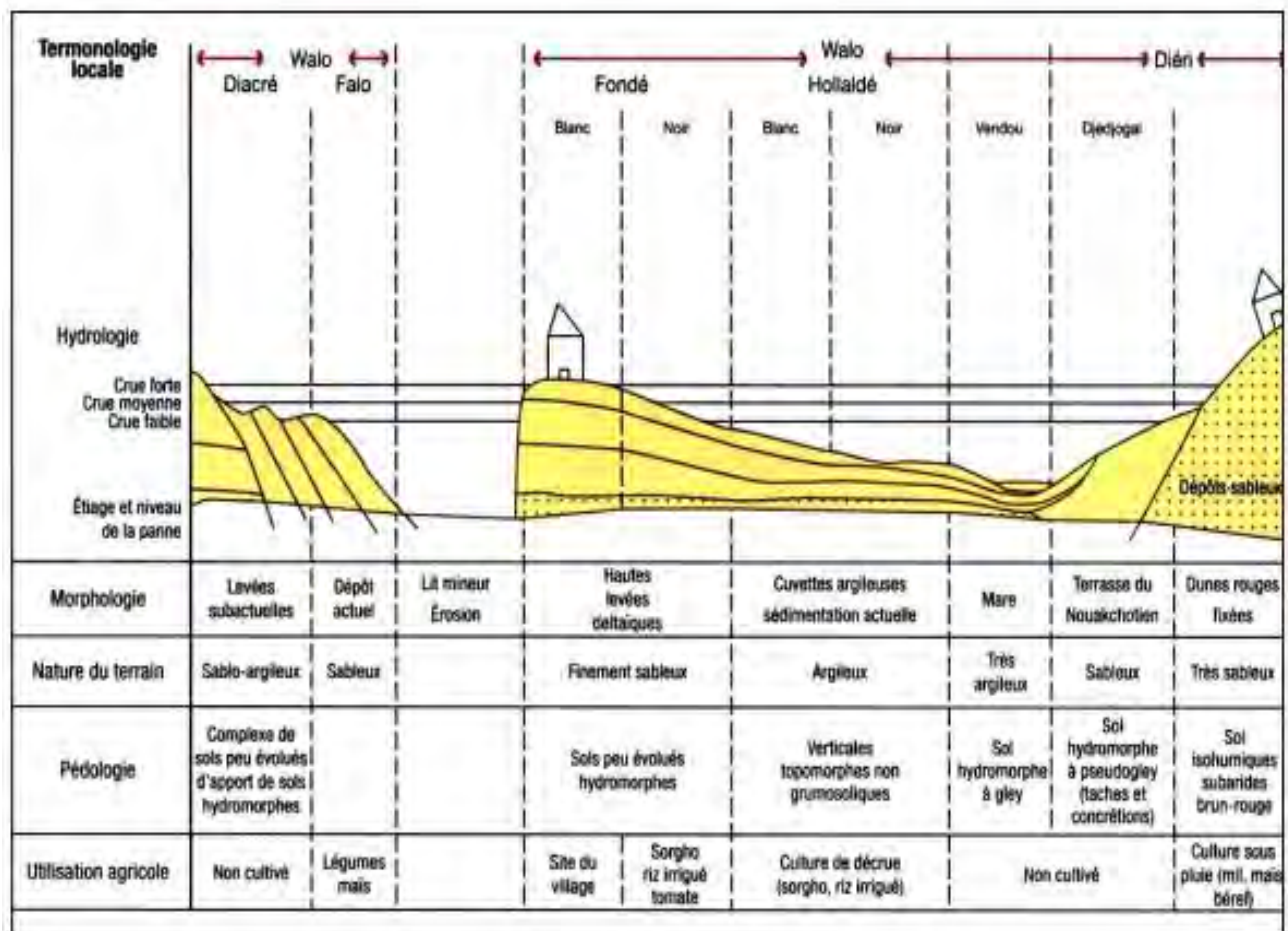


Figure 7 : coupe schématique transversale des terrains de la vallée du fleuve Sénégal (Cissé, 2008)

## I-4 Géomorphologie et Hydrologie

### I-4-1 La géomorphologie

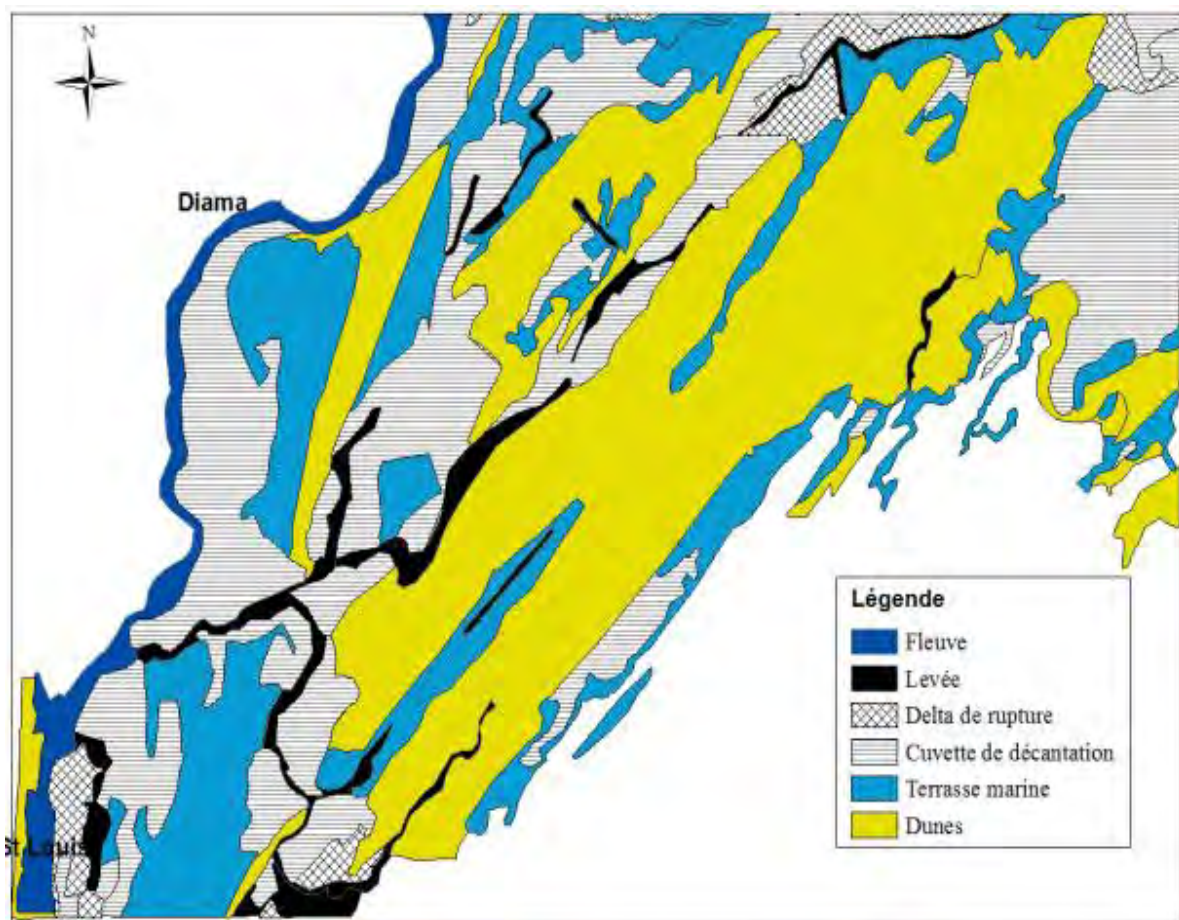
Du point de vue géomorphologique, le delta se présente comme un vaste ensemble au relief très bas constitué de plaines inondables et de bas plateaux parcouru par un réseau de chenaux anastomosés. Le fleuve alimente de part et d'autre de son cours deux dépressions naturelles (le lac Rkiz sur la rive droite en Mauritanie et le lac de Guiers sur la rive gauche au Sénégal). Il alimente également, une série de cuvettes de décantation à soubassement argileux (Ndiael, Khant, Nguine, Djoudj) et tout un réseau de marigots coulant le plus souvent sur des sols salés. La géomorphologie est étroitement liée à l'histoire géologique du D.F.S. La mise en place progressive de la vallée du fleuve Sénégal et l'évolution du réseau hydrographique ont permis la création de deux grands ensembles morpho-pédologiques. Une zone qui est régulièrement inondée par les crues du fleuve appelée Walo et une zone hors portée des crues ou Diéri.

La plaine alluviale « Walo » correspond aux formations du lit majeur et regroupe des unités géomorphologiques différentes dont les plus importantes sont :

✓ Les levées deltaïques : Ce sont des digues naturelles mises en place le long des cours d'eau (figure 8). Elles sont formées de sables fins et de limons jaunes bien compactés et souvent sulfatées-acides (Deckers et al, 1996). Elles sont caractérisées par leur altitude élevée, par rapport aux autres formations, généralement supérieure à 5m (in Gning, 2015). Pendant la crue du fleuve (avant barrage), les levées peuvent être rompues, entraînant la formation de deltas de rupture dont la texture est comparable à celle des levées.

✓ Les cuvettes de décantation : elles correspondent aux parties basses du lit majeur et s'étendent généralement en contrebas des levées. Ce sont des dépressions allongées plus ou moins parallèles au fleuve comblées de sédiments fins plus argileux. Ce sont des milieux propices à la riziculture

Le Diéri, constitué par des dunes de sables rouges orientées SW-NE, est situé au Sud du delta et à l'Est du Lac de Guiers. La zone de transition entre le Walo et le Diéri est occupée par des terrasses marines du Nouakchottien (figure 8)



**Figure 8 : Principales unités géomorphologiques du delta du fleuve Sénégal (Deckers et al, 1996 modifiée in Gning, 2015)**

#### I-4-2 Hydrologie

##### ❖ Le réseau hydrographique

Le réseau hydrographique du Delta du Fleuve Sénégal comprend la branche principale du fleuve et plusieurs de ses défluent qui forment, un réseau anastomosé permettant l'alimentation en eau potable des populations riveraines mais aussi l'irrigation de nombreux périmètres agricoles (Gning, 2015).

Le fleuve Sénégal long de 1800 km est formé par la réunion de deux rivières, le Bafing (principal affluent du Sénégal) et le Bakoye dont la confluence se situe à Bafoulabé (Mali) à 1055 km de l'embouchure (Sankharé et al, 2012). Il prend sa source en République de Guinée dans le massif du Fouta Djallon, traverse la partie occidentale du Mali puis constitue la frontière entre le Sénégal et la Mauritanie jusqu'à son embouchure (figure 9). Son bassin

versant de 335000km<sup>2</sup> (dont 25000 km<sup>2</sup> au Sénégal) peut être divisé en trois zones bien différenciées :

- Le Haut Bassin en amont de Bakel représente 2/ 3 de l'ensemble du bassin versant. Le relief y est accidenté avec des altitudes pouvant atteindre 1000 m.
- La Vallée proprement dite qui forme de Bakel à Richard –Toll un grand arc de cercle de 600 km de long et 15 km de large en moyenne. Le relief y est plat et peut être interrompu par les systèmes de levées fluvio-deltaïques.

Le Delta en aval de Richard –Toll sa superficie est de l'ordre 250000 hectares (SAED, 2009)

Au niveau du delta, le fleuve présente une pente faible, de l'ordre de 0.01<sup>0</sup> /<sub>00</sub>

La figure 9 représente ci-contre la carte du bassin du fleuve Sénégal



Figure 9 : Carte du bassin du fleuve Sénégal (in Ba, 2013)

Dans le delta, le fleuve Sénégal s'élargit considérablement à partir de Richard Toll en un réseau important de nombreux bras ou défluent et de marigots dont le fonctionnement est intimement lié à la crue du fleuve Sénégal. Le réseau hydrographique est constitué de plusieurs marigots dont les plus importants sont :

- Le Gorom comprend deux branches (le Gorom amont et le Gorom aval). Le Gorom amont prend sa source sur le fleuve Sénégal alimenté par la prise de Ronkh comprenant une station de pompage et un ouvrage hydraulique gravitaire (Cissé, 2008). Il coule jusqu'au village de Boundoum Barrage sur une distance de 25 km. Il assure l'irrigation de près 4600 ha (SAED, 1996) et l'alimentation du Kassack et du Lampsar qui se poursuit jusqu'à la réserve en eau potable de Saint-Louis (réserve de Bango). La partie Ouest est alimentée par le Kassack et fait office d'adducteur et la partie Est sert de drainage aux parcelles l'avoisinant. Le Gorom aval part du village de Boundoum Barrage, traverse le Parc National des Oiseaux de Djoudj (PNOD) avant de se jeter dans le fleuve Sénégal sur une distance de 31 km

- Le Lampsar

Il est formé par la réunion du Gorom amont et du Gorom aval dans le village de Boundoum avec une longueur de 70 km. Il prend sur son parcours, deux principales directions : de sa confluence avec le Gorom à Ross Béthio, le Lampsar coule du Nord au Sud puis il s'infléchit vers le Sud-Ouest jusqu'au marigot de Djeuss.

- Le Djeuss

Le Djeuss traverse la partie du Delta située entre sa débouchée dans le Lampsar en amont de Mbakhana et la cuvette de Boundoum Ouest. A l'ouest de Dakar-Bango, le Djeuss se jette dans le fleuve Sénégal mais avant de rejoindre celui-ci, il alimente entre Dakar-Bango et Mbakhana en défluent : le Ngalam. Ce dernier approvisionne la zone des 3 marigots

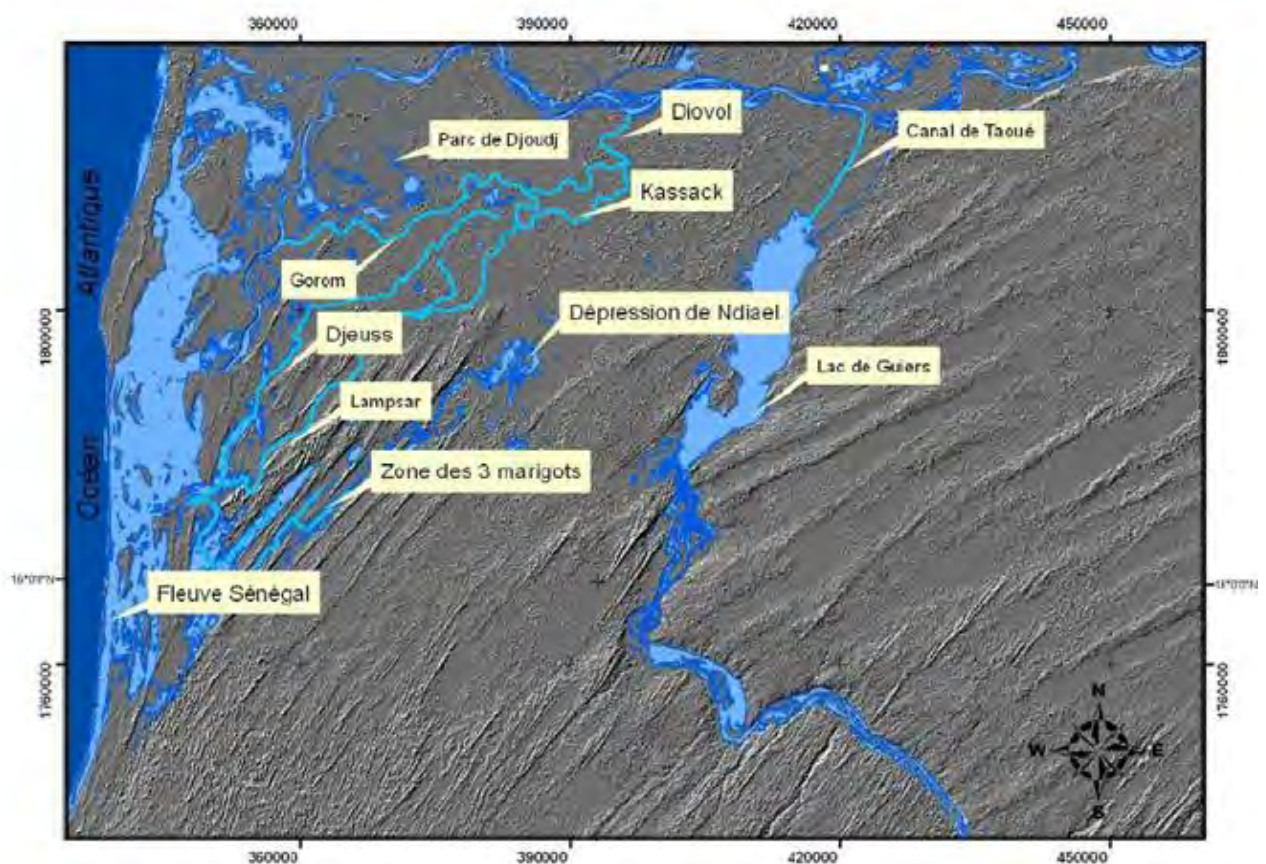
- Le Kassack

Il est défluent long de 30 km. Il coule au Gorom dans le sens Nord sud –Ouest. Il prend sa source le Gorom au niveau de la cuvette de Diambar et son extrémité est liée au Lampsar

- Le lac de Guiers

Il est une dépression de 50 km de long alimentée par le fleuve Sénégal via le canal de la Taouey. D'une superficie de 300 km<sup>2</sup> (Cogels, 1994), le lac est exploité pour l'AEP de la capitale Dakar et de plusieurs grandes villes grâce aux usines de Gnith et de Keur Momar Sarr. Il est également exploité pour l'irrigation de grands périmètres comme ceux de la Compagnie Sucrière Sénégalaise (CSS) ainsi que des Périmètres Irrigués Villageois (PIV) et des Périmètres Irrigués Privés (PIP) installés autour du lac.

La figure 10 représente la carte du réseau hydrographique du delta du fleuve Sénégal



**Figure 10: Carte du réseau hydrographique du Delta du fleuve Sénégal (in Diaw, 2008)**

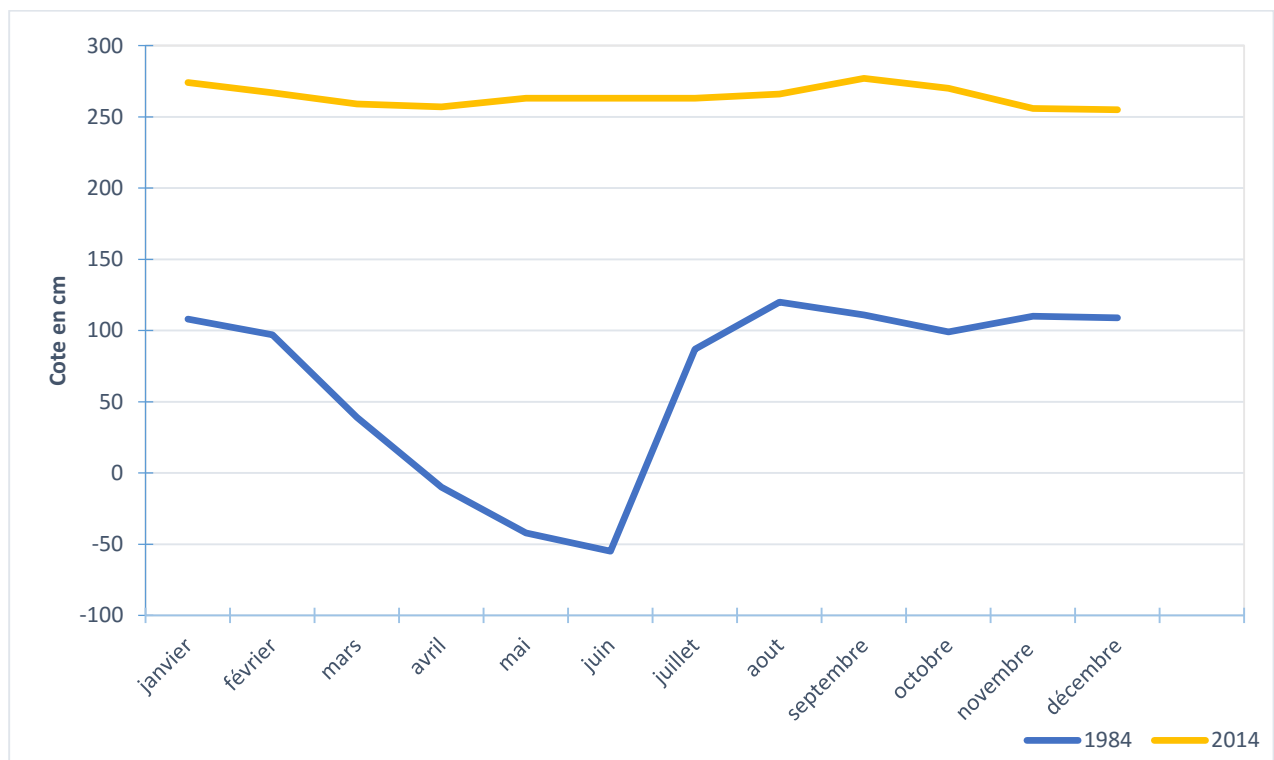
❖ Le régime hydrologique du fleuve

Le régime hydrologique naturel du fleuve est un régime tropical soumis au régime des pluies dans le haut bassin. Il est caractérisé sur son cours principal et ses défluent par l'alternance de deux périodes :

- Une période de hautes eaux ou période de crue de juillet à novembre due aux fortes pluies enregistrées dans le haut bassin du fleuve.

- Une période de basses eaux ou période d'étiage de décembre à juin caractérisée par une décroissance régulière des débits liée à la diminution des précipitations dans le haut bassin.

La figure 11 représente l'évolution du plan d'eau du fleuve à Richard Toll avant et après la mise en service du barrage de Diama (1984 et 2014). En 1984, le régime hydrologique présente une fluctuation saisonnière ; la crue du fleuve s'amorce dès le début de l'hivernage avec un maximum au mois d'août (1.2 m) et il s'en suit une baisse jusqu'à l'étiage maximal en mai/juin. Ainsi, la mise en service du barrage de Diama en 1986 a modifié le fonctionnement hydrologique du fleuve. En 2014, on note un relèvement du niveau du fleuve à une cote supérieure à 2.5 m durant toute l'année de sorte que la cote à l'étiage est à peine perceptible au-dessus de cette hauteur de gestion.



**Figure 11 : régime hydrologique du fleuve à Richard-Toll avant et après barrage**

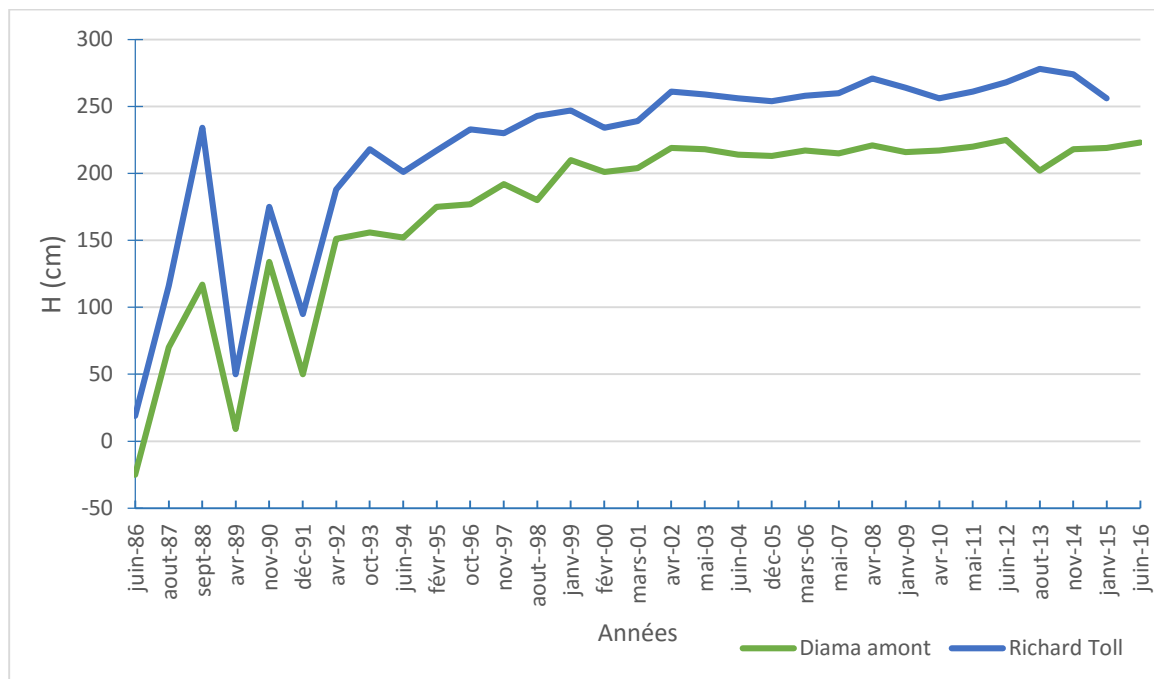
#### ❖ Evolution annuelle de la cote du fleuve après la mise en service du barrage

Les courbes d'évolution de la cote du fleuve couvrant la période après barrage sont représentées dans la figure 12 des stations de Diama amont et de Richard Toll. L'analyse de cette figure nous a permis de distinguer deux périodes distinctes :

- Une période allant 1986 à 1991 dont l'évolution de la hauteur d'eau est marquée par un relèvement progressif du niveau de base du fleuve. A Diama amont le niveau d'étiage est au-dessous du niveau de la mer en 1986 (-25 cm) et s'en suit un relèvement du niveau du fleuve pour atteindre 9cm en 1989 et 50 cm en 1991. A la station de Richard Toll par contre le niveau d'étiage est maintenu à une cote positive supérieure ou égale à 50 cm excepté l'année 1986 dont la cote est de l'ordre 19 cm.

- Une période de 1992 à 2016 durant laquelle on note une élévation brutale du niveau de base du fleuve qui est de l'ordre de 151 cm en 1992 (début de la gestion haute du barrage) à la station de Diama amont et 188 cm pour Richard Toll. Cette augmentation devient graduelle jusqu'à 2016. En effet le changement majeur observé durant cette période est la perturbation du caractère saisonnier. Avant la mise en service du barrage le niveau du fleuve s'élevait pendant la crue et s'abaissait pendant la décrue (voir figure 11). Selon Ngom, 2008 ce relèvement a un impact sur l'hydrologie du fleuve, on est passée d'une période d'écoulement en régime transitoire de type intertropical saisonnier à un régime d'écoulement quasi permanent

La figure 12 représente l'évolution du plan d'eau du fleuve après la mise en service du barrage de Diama



**Figure 12 : Evolution du plan d'eau du fleuve après la mise en service du barrage de Diama**

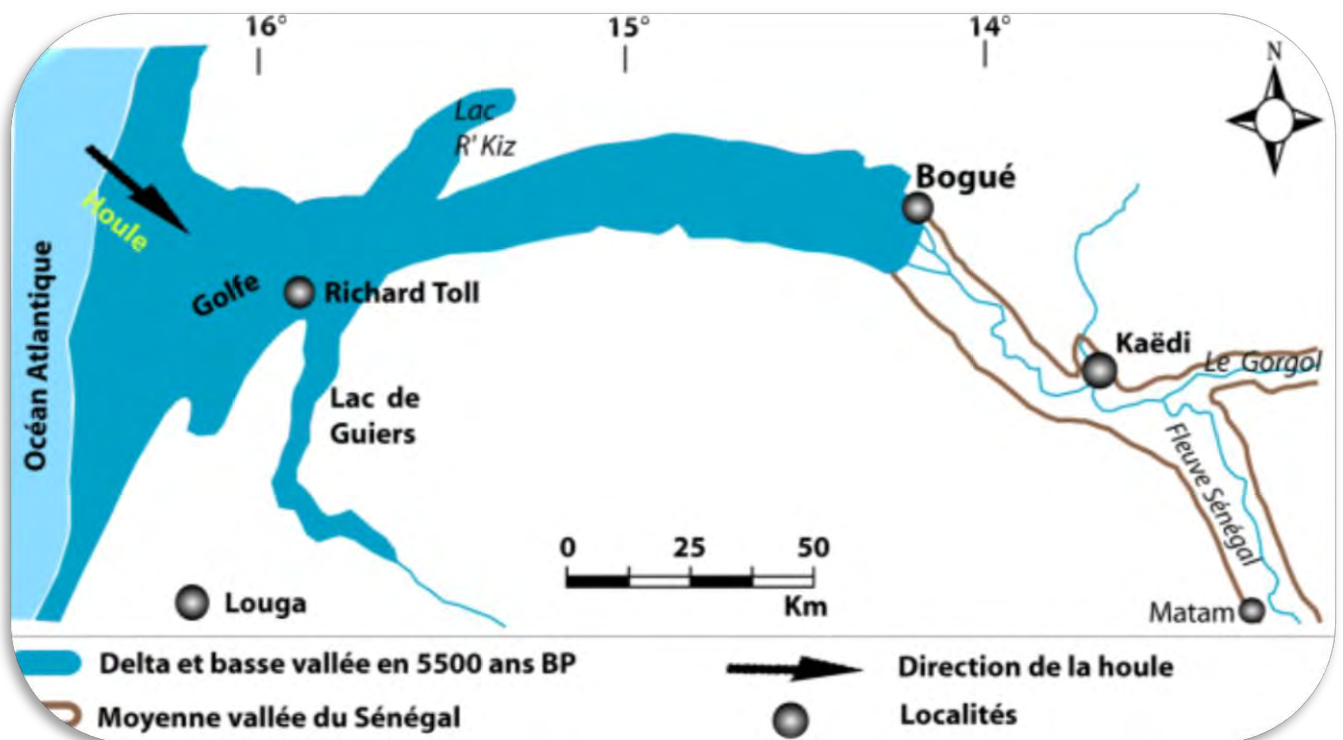
## I-5 Contexte géologique et hydrogéologique

### I-5-1 Le contexte géologique

#### ❖ Cadre général

L'histoire géologique du bassin du fleuve Sénégal est inscrite dans celle du bassin sédimentaire sénégal-mauritanien auquel il appartient. La formation de ce bassin a débuté au Jurassique moyen et résulte de la distension de la plaque africaine et de la plaque américaine engendrant l'ouverture de l'océan atlantique. Il s'en est suivi, du Jurassique moyen au Maastrichtien, la phase "post -rift" marquée par une forte accumulation de sédiments (plusieurs milliers de mètres) à dominante détritique (Y. Bellion, 1987). Après cette longue période continentale, au Tertiaire, la mer envahit le bassin constituant un vaste golfe sur le sud-ouest de la Mauritanie et la majeure partie du Sénégal. Les dépôts marins (calcaires, marnes, argiles, sables) sont recouverts par endroits d'une série détritique gréseuse appelée Continental – Terminal (in Cissé, 2008).

Au Quaternaire, la mer a envahi à plusieurs reprises les régions côtières par des séquences de transgressions et régressions. Selon Kane, 1997 (in Cissé, 2011) la dernière transgression



attribuée au Nouakchottien a réellement donné au paysage Deltaïque de la basse vallée du fleuve Sénégal son aspect actuel (voir figure 13). La mer du Nouakchottien a édifié un golfe à l'emplacement du Delta et la basse vallée, formant une vaste ria large de 5 à 25 km dans la vallée inférieure du Sénégal (in Cissé, 2011)

**Figure 13: La transgression du Nouakchottien à son maximum en 5500 ans BP (in Cissé, 2011)**

#### ❖ La litho stratigraphie

Les formations géologiques, présentes dans cette région, sont connues grâce à l'étude des travaux antérieurs et les piézomètres implantés par le projet des eaux souterraines de l'OMVS /USAID.

##### -Le Maastrichtien

Le Maastrichtien est présent sur l'ensemble du bassin sédimentaire sénégal mauritanien et constitue des sables hétérométriques souvent grossiers avec quelques passées d'argiles et des grès sableux à niveau de quartz translucide, l'ensemble ayant une épaisseur de 300 m environ (Cissé, 2008). Le toit du Maastrichtien est à des profondeurs variables sub affleurant à l'est du delta aux environs de Dagana il a une cote variant entre -20 et -60 m (Diagana, 1994). Il est atteint à l'Ouest de Rosso à des profondeurs de -150 à -200 m et -400 m à Saint-Louis (LE Priol, 1985)

##### -Le Paléocène

Il est caractérisé par des calcaires et des marnes devenant de plus en plus gréseux vers l'Est. Il est situé à 15 m de profondeur au sondage de Keur-Mour près de Dagana et on rencontre une trentaine de mètres de calcaire coquillier à Rosso (Diao, 1992).

##### -L'Eocène inférieur

Essentiellement marneux et argileux, il s'est développé à l'ouest (avec une épaisseur de 150 m à Toundou Besset et 200 m à Saint-Louis) à l'Est, il a été complété érodé par le fleuve (Richard –Toll) du fait de sa position haute sur l'anticlinal de Guiers mais on trouve une trentaine de mètres à Rosso avec des faciès argilo –gréseux. Il apparaît à l'affleurement sur les berges du lac de Guiers (Diao, 1992).

#### -L'Eocène moyen

Il est très largement représenté dans le bassin du Sénégal. Il est sub affleurant ou même affleurant dans une partie importante de la vallée du fleuve Sénégal en aval de Bakel (région de Matam). Les dépôts lutétiens surmontent les formations antérieures en continuité, ce sont des faciès argile-marneux ou calcaires dont le sommet est souvent tronqué par l'érosion. Il est connu à l'ouest du Delta atteignant 200 m: calcaires marneux, marnes et surtout calcaires à nummulites (DA BOIT, 1992)

#### -L'Eocène supérieur

A l'Eocène supérieur, le bassin sédimentaire, complètement exondé, se couvre d'une épaisse couche de sables, d'argile et surtout de grès plus ou moins argileux bariolé. Ces dépôts détritiques présentent un faciès sidérolithique et vont de l'Eocène supérieur à la fin du pliocène (C. T).

#### -Le Continental-Terminal

A la fin du Miocène, la régression s'amorce et des sédiments détritiques (sables, grès détritiques, argiles) se déposent dans le bassin sédimentaire : c'est le Continental-Terminal daté du Mio-Pliocène et représenté au Sénégal par une formation argilo—sableuse azoïque rubéfiée qui se termine généralement à son sommet par une cuirasse latéritique (Ba, 2013).

#### -Le Quaternaire

##### Le Quaternaire ancien et moyen

Difficile à différencier des étages supérieurs du Tertiaire, il est présent à Rosso et totalement absent sur le dôme anticlinal entre Richard –Toll et Dagana (ou dôme de Guiers). A Gnith, il montre des formations très hétérogènes (alternance des niveaux de cuirasse, graviers et de sables) l'ensemble reposant sur les argiles feuilletées du Lutétien. Il se termine par la mise en place des ergs qui, en rive droite, bordent le lit majeur du fleuve de Boghé à l'Océan Atlantique. Ces ergs se rencontrent également à l'Ouest du lac de Guiers et dans tout le Ferlo septentrional (Diao, 1992).

##### Le Quaternaire récent

DIOP FATOU LAYE  
MEMOIRE MASTER II HYDROGEOLOGIE

#### L'Inchirien (40 000 ans BP)

Deux phases de transgressions séparées par une courte phase de régression ont permis de distinguer l'Inchirien I et l'Inchirien II (Audibert, 1970). L'Inchirien I est constitué par des sables grossiers coquilliers ou à graviers variés (quartz, jaspes, et grés ferrugineux) avec une tendance argileuse augmentant vers l'ouest de Richard Toll. Son épaisseur est de 5 m à Richard Toll et de 10 m à Rosso. L'Inchirien II est constitué de dépôts de couches sableuses et argileuses avec une épaisseur de 12 à 20 m entre Dagana et Rosso.

#### L'Ogolien (20.000 à 10.000 ans BP)

C'est une période très sèche marquée par une régression de la mer jusqu'à - 100 m (Diaw, 2008). Ainsi, l'aridité du climat combinée à l'intensification de l'action éolienne des sables conduit à la formation de dunes de sable longitudinales suivant une direction NNE-SSW sur le littoral (Le BRUSQ, 1980). Ces sables quartzeux et homogènes, bien triés traduisent un façonnement unique par le vent et l'absence de remaniement par l'eau (Kane, 1997). La mise en place de ces dunes ferme progressivement l'accès du fleuve à la mer et met la vallée dans un régime endoréique (Loyer, 1989).

#### Le Tchadien (10.000 à 6.800 ans BP)

Le niveau marin se relève vers - 50 m (Gac J. Y, 1993) et l'humidité du climat favorise la fixation des dunes ogoliennes par la végétation et leur rubéfaction (dunes rouges). Le fleuve, qui grossit par ses crues recrée son lit à travers les dunes pour rejoindre l'océan dont le niveau monte lentement. L'écoulement redevient plus important sur le réseau hydrographique.

#### Le Nouakchottien 6.800 à 4.200 ans BP

Le Nouakchottien est caractérisé par une phase de transgression de grande ampleur qui a réellement façonné le Delta du fleuve Sénégal. L'océan envahit les terres jusqu'à Boghé à 250 km de la côte actuelle occupant toutes les dépressions voisines : lac de Guiers et lac Rkiz, basse vallée du Ferlo et donnant naissance à une ria. Les vases marines décelées en amont de Bogué témoignent de cette période de maximum de transgression une sédimentation marine puis lagunaire (Michel, 1973). La transgression atteint son niveau le plus élevé vers 5 500 BP (1,5 à 2,5 m au-dessus de la cote IGN), ce qui déterminera la dynamique future du delta (Diaw, 2008). Ainsi en aval de Richard-Toll, le delta du Sénégal se met progressivement en place. Un mélange

de sables et de coquilles d'*Anadara Senilis* se dépose sur les cordons dunaires ogoliens en partie démantelés pour former la terrasse nouakchottienne qui affleure dans certains endroits du delta

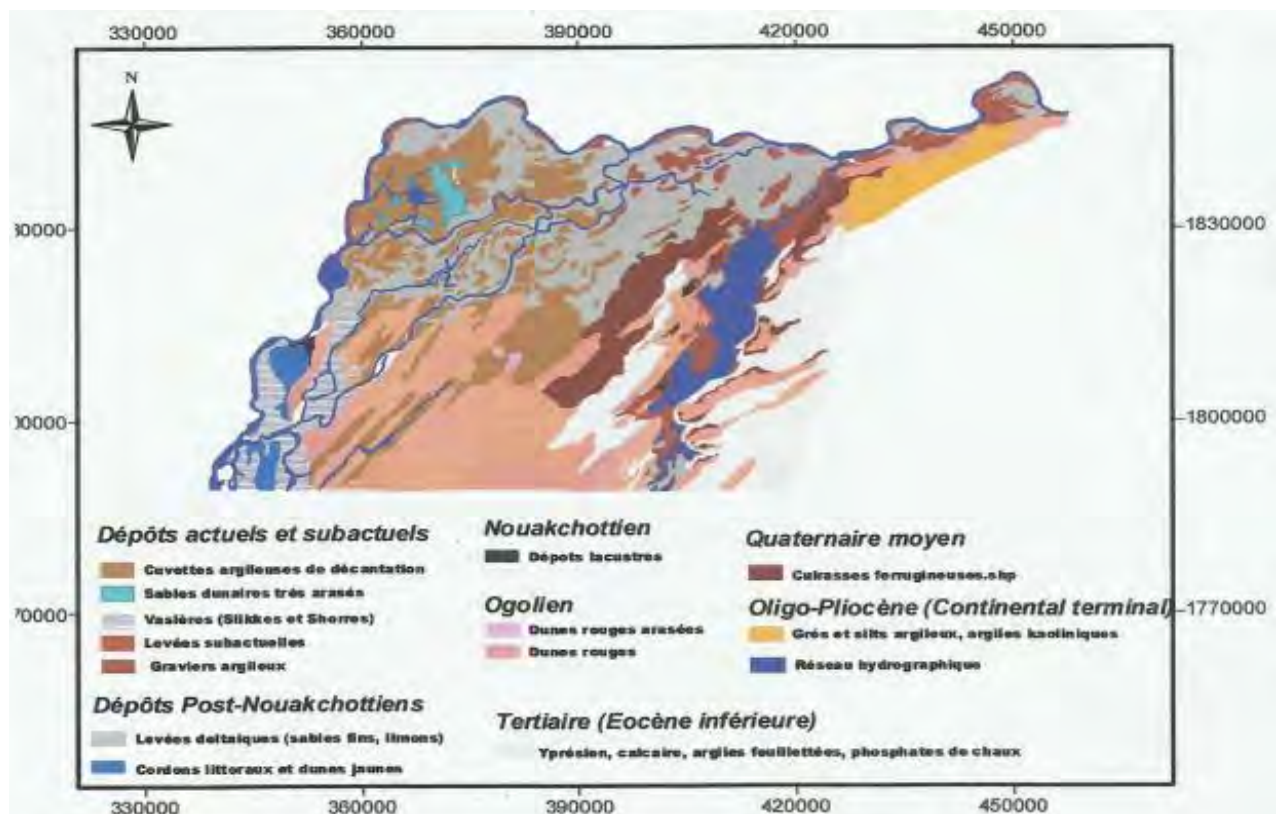
Le Tafolien 4200-2000 ans BP

C'est une phase aride qui voit le retrait de la mer s'amorcer progressivement laissant derrière, des dépôts salés. Les sables des plages sont charriés par les courants des alizés pour édifier une succession de cordons sableux (Dieng, 2015). Les débits sont limités et le fleuve communique avec l'océan à travers des passes instables aux contours sinueux qui constituent des méandres. Le Sénégal construisait à cette époque de puissants bourrelets de berges dont les parties hautes ne sont plus submersibles (système de hautes levées). La sédimentation fluviale se substitue peu à peu à la sédimentation lagunaire, avec un niveau de vase qui recouvre la terrasse nouakchottienne

Subactuel et Actuel

L'évolution récente du DFS durant les deux derniers millénaires de Subactuel et Actuel est marquée par une relative stabilisation générale du cours fluvial. Durant cette période, la sédimentation s'est effectuée à une côte plus basse et se poursuit actuellement de la même façon (Diaw, 2008). Le fleuve occupe progressivement ces hautes levées et façonne des systèmes de levées subactuelles et actuelles qui constituent les derniers bourrelets de berges plus basses que les grandes levées du Tafolien. Les cuvettes de décantation dessinent une mosaïque complexe en contrebas des levées. Dans le bas-delta, l'avancée des sables éoliens vers l'intérieur détermine l'apparition de dunes paraboliques semi-fixées tandis que le développement de la flèche sédimentaire qui constitue la langue de Barbarie ferme l'embouchure du fleuve (Dieng, 2015).

La figure 14 représente la carte géologique du Delta du fleuve Sénégal



**Figure 14: Carte géologique du delta du fleuve Sénégal (Cissé, 2008)**

#### I-5-2 Contexte hydrogéologique

Plusieurs études hydrogéologiques (Ily (1973), Audibert (1970), OMVS/USAID (1990), Diagana (1994), Thiebaut et al (1993)) dans le cadre du projet EQUSEN ont permis de différencier deux systèmes d'aquifères dans le Delta du fleuve Sénégal en rapport avec la litho stratigraphie: un système aquifère profond et un système aquifère superficiel

##### ❖ Le système aquifère profond

Il est constitué par l'aquifère du Maastrichtien et l'aquifère du Tertiaire

-L'aquifère du Maastrichtien est constitué de formations sableuses fines à grossières. Il est présent partout sur le bassin sénégal-mauritanien et représente l'aquifère le plus exploité au Sénégal (Gning, 2015). Selon Diagana (1994), la nappe du Maastrichtien est, par endroit, captive sous les formations de l'Eocène.

Au niveau du delta du fleuve Sénégal, son toit se situe à une profondeur relativement faible par rapport à sa profondeur moyenne dans le bassin et se situe à -50 m à la jonction entre le

DIOP FATOU LAYE

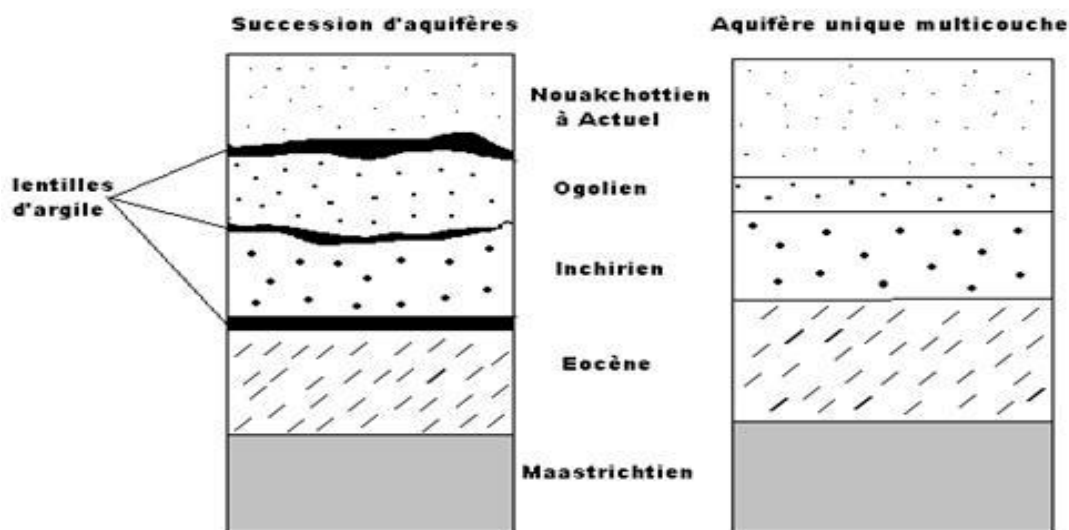
MEMOIRE MASTER II HYDROGEOLOGIE

canal de la Taouey et le lac de Guiers (Saos et al, 1991 ; Ngom, 2013). Au niveau de l'anticlinal du Guiers, le Maastrichtien entre en contact direct avec les alluvions de la vallée et est alimentée via la nappe superficielle (Diagana, 1994).

-L'aquifère du Tertiaire est contenu dans les calcaires du Paléocène et les marno-calcaires de l'Eocène (Gning, 2015). L'Eocène est représenté sur tout le bassin sédimentaire sénégalomauritanien, excepté la zone d'affleurement du Maastrichtien où il a été érodé. Cette formation n'est donc pas continue, elle est absente au niveau des dômes du Maastrichtien (Touzi, 1998). La nappe est localement présente au niveau de l'anticlinal de Guiers (Ngom, 2013).

#### ❖ Le système aquifère superficiel

L'aquifère superficiel est contenu dans les formations sablo-argileuses du Quaternaire. Du fait de l'hétérogénéité des dépôts quaternaires, la nappe superficielle peut être contenue dans des unités lithologiques différentes (DA BOIT, 1992). Ainsi, en rapport avec la géomorphologie, Audibert (1970) distingue l'aquifère superficiel des formations alluviales ou des terres basses et l'aquifère superficiel des formations dunaires. L'aquifère superficiel des formations dunaires est localisé plus au sud et au sud-ouest du DFS. Il est contenu dans les dunes jaunes récentes ou dans les dunes rouges ogoliennes. Cet aquifère renferme une nappe salée constituée par des lentilles d'eau douce (figure 15). C'est la raison pour laquelle il est exploité par des puits villageois peu profonds (Diaw, 2008). L'aquifère superficiel des terres basses est contenu dans les formations complexes d'origine lagunaire et fluvio-deltaïques. Il occupe la presque totalité du delta du fleuve Sénégal (Gning, 2015).



**Figure 15: Coupe schématique de variation du système aquifère dans la vallée (in Gning, 2015)**

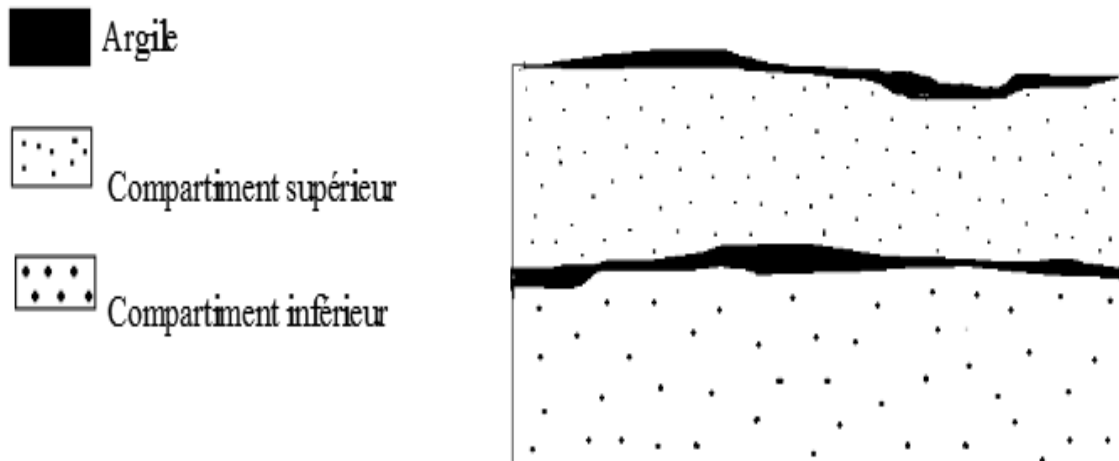
- L'aquifère alluvial du delta du fleuve Sénégal

L'organisation du système aquifère alluvial dans la zone du Delta est décrite par plusieurs études ((OMVS ,1991 ; DA BOIT, 1992 ; SAED 1998; Dieng, 1997 ; Diaw, 2008, Ngom, 2013 ; Gning, 2015) comme celle d'un aquifère unique constitué de deux réservoirs superposés :

- Un réservoir supérieur constitué des sables fins du Nouakchottien, parfois de la partie supérieure de l'Inchirien. Son épaisseur est très variable de 0 à 12 m. Ce compartiment aquifère, est géométriquement captif et/ou libre selon la présence d'une couche semi-perméable (argile et/ou silt) en surface appartenant aux sédiments actuels ou subactuels (DA BOIT, 1992). Vers l'est du delta, le compartiment supérieur présente une hétérogénéité granulométrique et une structure en lentille (Diaw, 2008)
- Un réservoir inférieur avec des sédiments essentiellement composés de sables fins à grossiers avec une fraction silteuse significative appartenant à l'Inchirien 1 ou 2 sauf à l'ouest où l'Inchirien 2 appartient à l'aquifère du Nouakchottien (Diaw, 2008). L'épaisseur exacte n'a pas pu être déterminée. L'aquifère inférieur est dans l'ensemble captif avec la présence d'une épaisse et étendue couche argileuse et/ou sablo argileuse du second niveau (Diaw, 2008). Plus à l'est dans la basse vallée une communication hydraulique s'opère entre les deux compartiments au niveau de l'anticlinal de Guiers due à l'absence de niveau imperméable

entre la nappe superficielle contenue dans les calcaires et les sables du Maestrichtien (Diagana, 1990 in Diaw, 2008).

La figure ci-après représente le système hydrogéologique superficiel du Delta



**Figure 16: Schéma des aquifères du Delta (Diaw, 2008)**

- Les paramètres hydro dynamiques

Les données sont extraites principalement des travaux antérieurs effectués dans le Delta. Les paramètres hydrodynamiques sont : la porosité, la transmissivité, le coefficient d'emménagement et la perméabilité (tableau 1)

**Tableau 1 : valeurs des paramètres hydrodynamiques de la nappe alluviale du DFS (Ngom, 2013)**

travaux	zone d'étude	aquifère capté	$T_{m^2/s}$	$K_{m/s}$	S
BRGM (1964-1965)	Diovol-Garak	compartiment supérieur	2 à $4.10^{-4}$		$1,3.10^{-4}$
SOGREAH (1978)	Lac de Guiers	compartiment supérieur		$2.10^{-4}$	
OMVS (1988)	Lac -Mbilor Dieri	compartiment supérieur	$1.10^{-3}$	$1.10^{-5}$	
	K.Madické-Madina Gaya	compartiment supérieur	$1.10^{-2}$		
Diagana (1990)	Lac -Mbilor Dieri	compartiment supérieur	$1.10^{-3}$	$6.10^{-5}$	$4,5.10^{-4}$
OMVS (1990)	Delta et la basse vallée	compartiment supérieur	$1,08.10^{-4}$ à $4,8.10^{-6}$	0,4 à $8,4.10^{-4}$	$7.10^{-5}$ à $2,2.10^{-3}$
		compartiment inférieur	$1,7.10^{-5}$ à $8.10^{-6}$	0,4 à $8,4.10^{-4}$	

## **II MATERIELS ET METHODES**

### **II-1 Acquisition des données**

#### **II-1-1 Données hydrologiques**

Les données hydrologiques proviennent de la Direction des Ressources en Eau de Saint-Louis. Ces données concernent les stations hydrométriques de Richard Toll (avant et après la mise en service du barrage) et de Diama amont après barrage

#### **II-1-2 Données piézométriques**

Les données piézométriques sont recueillies à partir de la base de données de la SAED constituée d'un réseau de piézomètres. Ce dernier est suivi par la SAED sur une base mensuelle. Ces données ont permis d'avoir l'évolution du niveau de la nappe, de connaître l'emplacement des piézomètres en X et Y, de savoir le type de sol, le type de nappe, ...

### **II-2 Critique des données**

A la différence des données hydrologiques, les données piézométriques présentent d'énormes lacunes pour diverses raisons. Un grand nombre de piézomètres ne sont plus fonctionnels (vandalisme, bouché par effondrement, crépines endommagées, ...). Le suivi des piézomètres n'est pas régulier en particulier pendant l'hivernage (prolifération des végétaux aquatiques, piézomètres inaccessibles...). L'autre problème auquel nous avons été confrontés est la non disponibilité des données piézométriques avant barrage. Le suivi des piézomètres a été entamé dans le cadre du projet "eaux souterraines" de l'OMVS après la mise en service des barrages (1987 à 1991). Le processus a été interrompu puis repris depuis 1997 à nos jours par la SAED qui intervient dans la rive gauche du fleuve Sénégal.

### **II-3 Traitement des données**

L'exploitation des données a été faite sur la base de différents logiciels

-Le logiciel Excel a permis de représenter les données piézométriques et pluviométriques sur des graphiques, d'effectuer des calculs, de faire des diagrammes binaires...

DIOP FATOU LAYE

MEMOIRE MASTER II HYDROGEOLOGIE

-Arc Gis : pour extraire les altitudes, cartographier les points d'eau, les aménagements hydro agricoles...

#### II-4 Répartition des ouvrages

Pour étudier le fonctionnement hydrodynamique de la nappe, nous avons exploité 10 piézomètres (figure 17) répartis en fonction de la distance au cours d'eau et de la présence ou non d'un aménagement hydro-agricole. Ainsi on distingue quatre groupes :

- Groupe 1 : ils sont représentés par les piézomètres du bas delta (GA0006 et GA0023) et se trouvent dans des zones non aménagées et proches du fleuve afin de mettre en évidence l'impact du fleuve sur la dynamique de la nappe alluviale
- Groupe 2 : ils sont représentés par les piézomètres GA0002 et GA0120. Ce sont des piézomètres qui se trouvent hors aménagement et loin de tout cours d'eau
- Groupe 3 : Les piézomètres GA0054, GA0071 et GA0072 qui le constituent se trouvent en zone aménagée et loin d'un cours d'eau afin d'évaluer l'impact de l'irrigation sur la nappe
- Groupe 4 : Il regroupe les piézomètres GA0066, GA0067 et GA0068 qui sont situés dans un aménagement hydro agricole et proche d'un cours

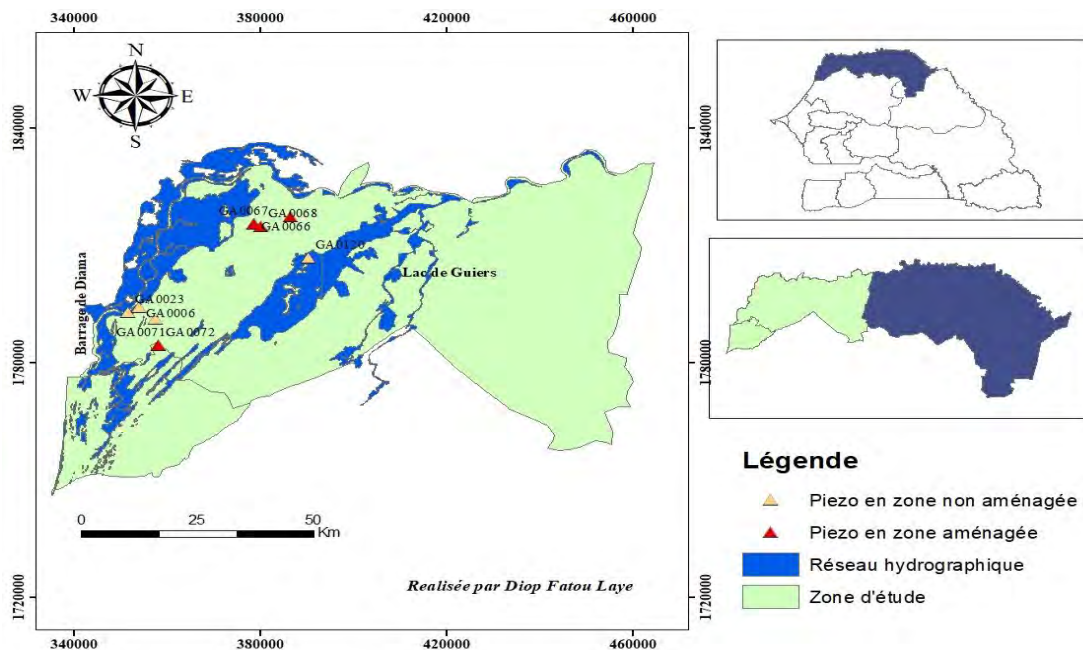


Figure 17 : Carte de localisation des piézomètres

### III RESULTATS ET DISCUSSIONS

#### III-1 Relation eaux de surface/ eaux souterraines

##### ❖ Evolution du niveau piézométrique de la nappe en zones proches d'un cours d'eau

Dans cette partie nous avons établi la corrélation entre les niveaux piézométriques de la nappe et les hauteurs mensuelles du fleuve mesurées à la station de Diama amont.

Dans cette corrélation nous avons cherché à mettre en évidence l'impact de la gestion du barrage de Diama sur la recharge de la nappe compte tenu de la proximité du cours d'eau.

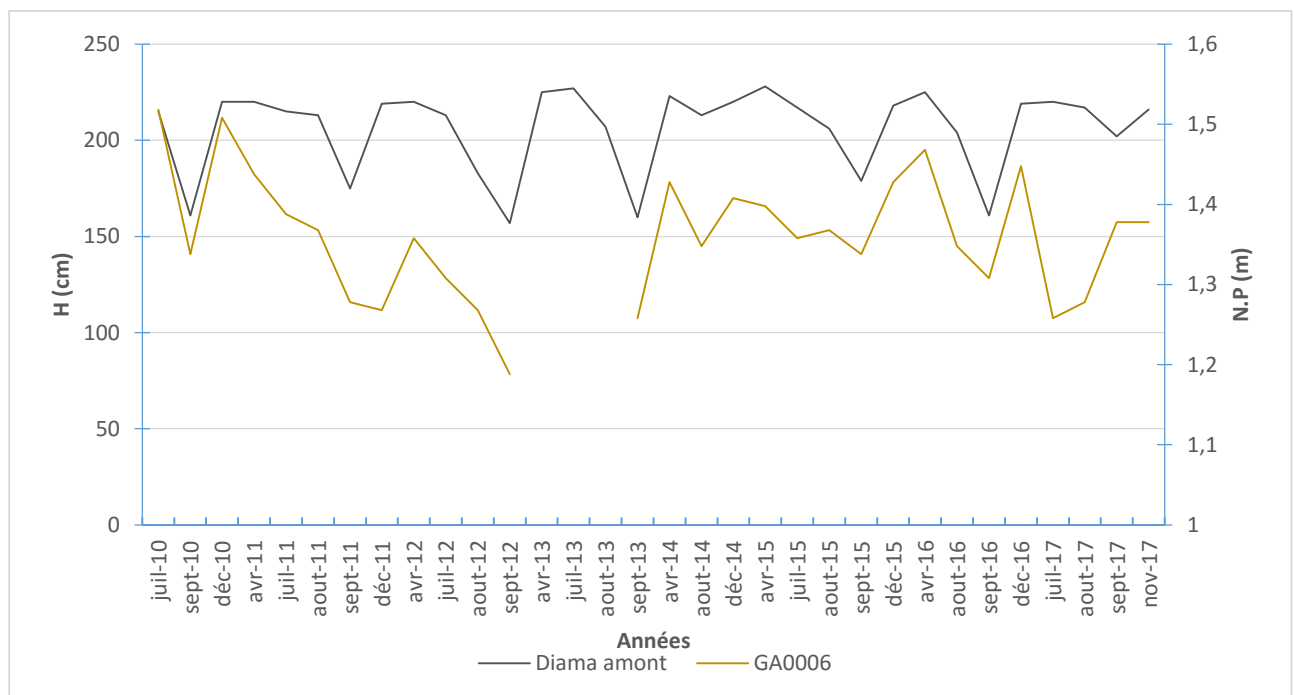
Le tableau ci-dessous décrit les caractéristiques des piézomètres choisis loin des zones aménagées et en fonction de la distance au cours d'eau le plus proche

**Tableau 2 : Caractéristiques des piézomètres du groupe 1**

Piézomètres	Nappe	Profondeur (m)	Cours d'eau (c.e)	Elévation IGN (m)		Distance au c.e (m)
				repère	base	
GA0006	Inchirien	13	Fleuve Sénégal	4.89	3.65	800
GA0023	Inchirien	13	Fleuve Sénégal	4.28	3.05	132

La figure 18 présente l'évolution du niveau de la nappe dans le piézomètre GA0006 (groupe 1). Dans cette zone, les fluctuations piézométriques sont faibles et ont tendance à se corrélérer avec le niveau du fleuve au cours de la saison des pluies (de juillet à septembre). En période de saison sèche, le niveau de la nappe remonte en liaison avec celui du fleuve. En effet, la gestion du barrage a fait que la hauteur d'eau est maintenue à une cote d'environ 2 m IGN. Pendant la crue, avec l'ouverture des vannes du barrage, on note une baisse du niveau du fleuve qui se répercute sur le niveau piézométrique de la nappe. En période de décrue, lorsque le niveau du fleuve augmente avec la fermeture du barrage, le niveau de la nappe remonte.

On observe un léger décalage entre la hausse du fleuve et celle de la nappe traduisant le temps de réponse du réservoir souterrain. On peut en déduire que les mouvements de la nappe suivent ceux du fleuve en amont de Diama à cette distance (à 800 m du fleuve) d'où une relation étroite cours d'eau/ nappe. De ce constat, on peut tirer la conclusion que l'alimentation de la nappe à cette distance au cours d'eau est principalement assurée par ce dernier.



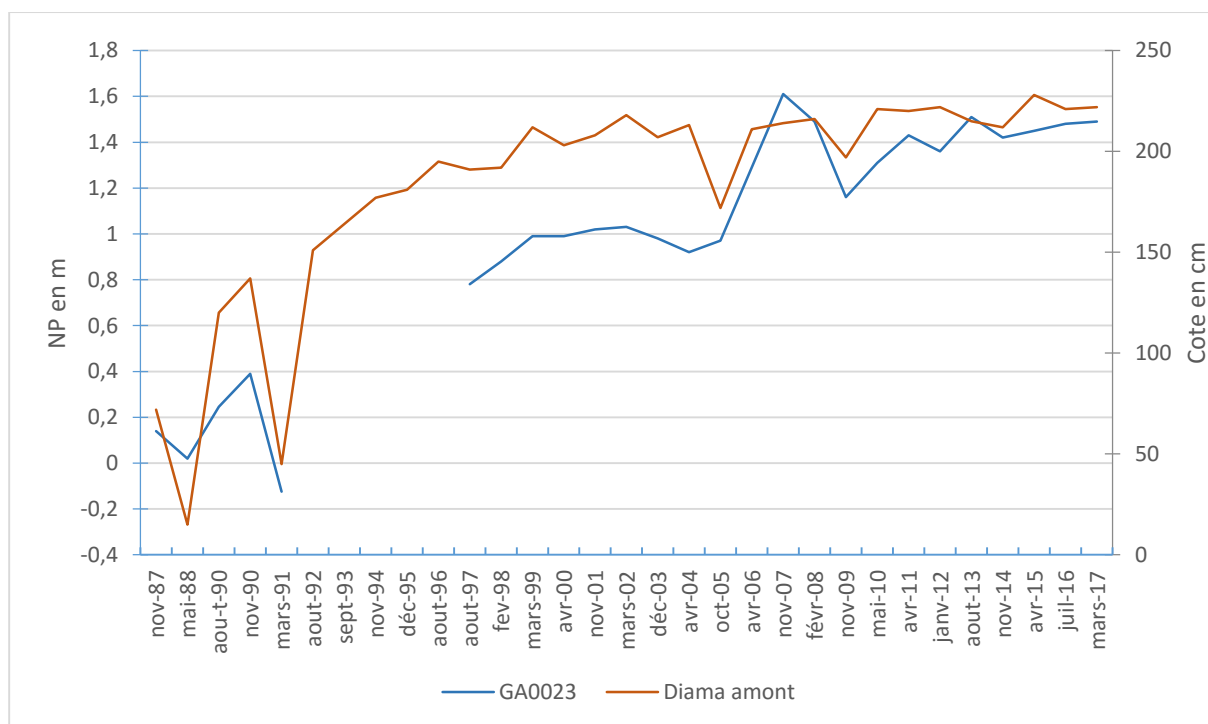
**Figure 18 : relation nappe / cours d'eau**

Le piézomètre GA0023 qui capte la nappe inférieure de l'Inchirien est située à 132 m du fleuve Sénégal et en zone non irriguée. La figure 19 illustre l'évolution annuelle du niveau de la nappe de 1987 à 2017 en parallèle avec la cote du fleuve. L'analyse de cette figure nous a permis de distinguer deux périodes :

De 1987 à 1991 on note un relèvement du niveau de base du fleuve dont l'évolution est similaire à celle de la nappe. Les fluctuations de la nappe suivent celles du fleuve qui présentent un régime saisonnier. La crue s'amorce au mois d'août /septembre suivie d'une baisse à partir de novembre, elle est donc rechargée pendant la crue et se décharge à l'étiage d'où une relation étroite "cours d'eau/nappe".

De 1997 à 2017 on constate un rehaussement significatif de la hauteur du fleuve et du niveau piézométrique. Il faut noter qu'en 1992, le barrage de Diama a été utilisé pour relever le niveau du plan d'eau du fleuve afin de permettre la pérennisation d'eau douce durant toute l'année et d'intensifier l'agriculture par irrigation. Ceci est à l'origine de la hausse du niveau de la nappe corrélativement à celle du fleuve. Le niveau de la nappe qui oscillait entre -0,1 m à 0,4 m au cours de la première période se situe entre 0,8 m et 1,5 m de 1997 à 2017

Les fluctuations piézométriques montrent une nette influence de la gestion du barrage sur la nappe. On peut conclure que la nappe est rechargée par le fleuve pendant la crue et se décharge pendant la décrue.



**Figure 19 : Evolution annuelle du niveau de la nappe en parallèle avec la hauteur du fleuve**

#### ❖ Evolution du niveau piézométrique en zones éloignées d'un cours d'eau

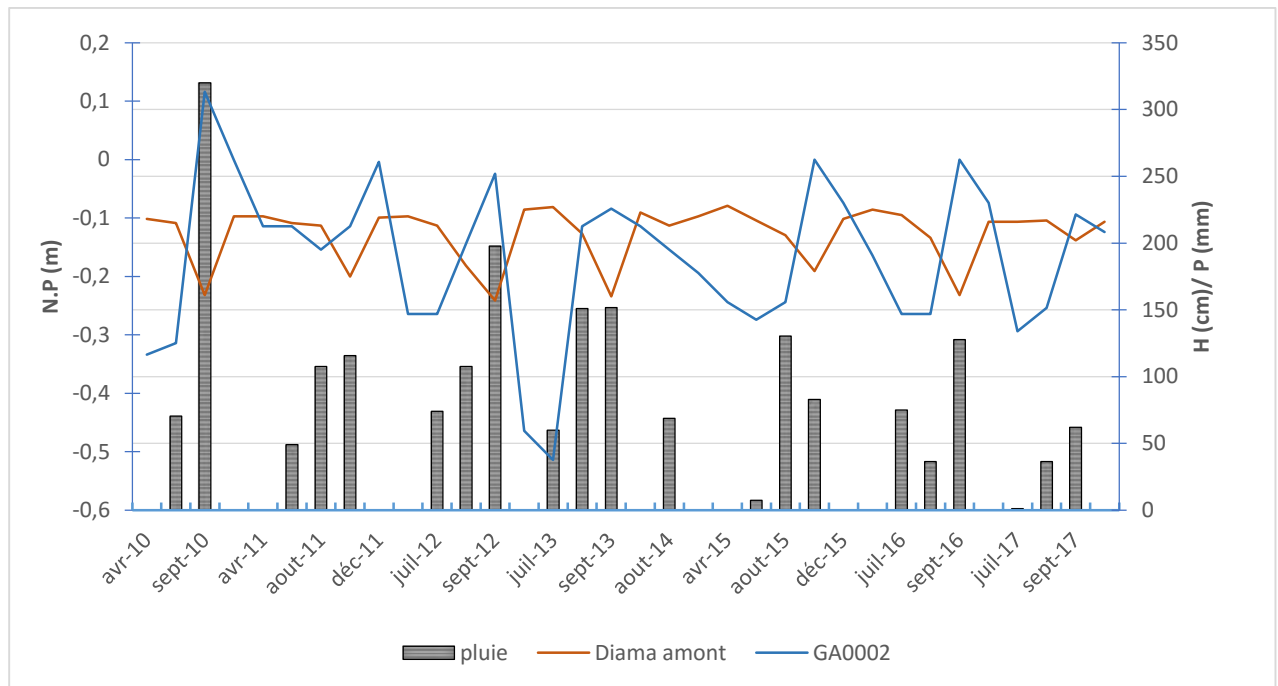
Les piézomètres GA0002 et GA0120 situés loin des cours d'eau et hors aménagements hydro-agricoles (groupe 2) sont utilisés pour établir cette relation. Pour cela, les niveaux piézométriques mensuels, la pluviométrie et la hauteur du fleuve sont représentés sur un même graphique.

Le tableau ci-dessous représente les caractéristiques des piézomètres du groupe 2

**Tableau 3 : caractéristiques des piézomètres du groupe 2**

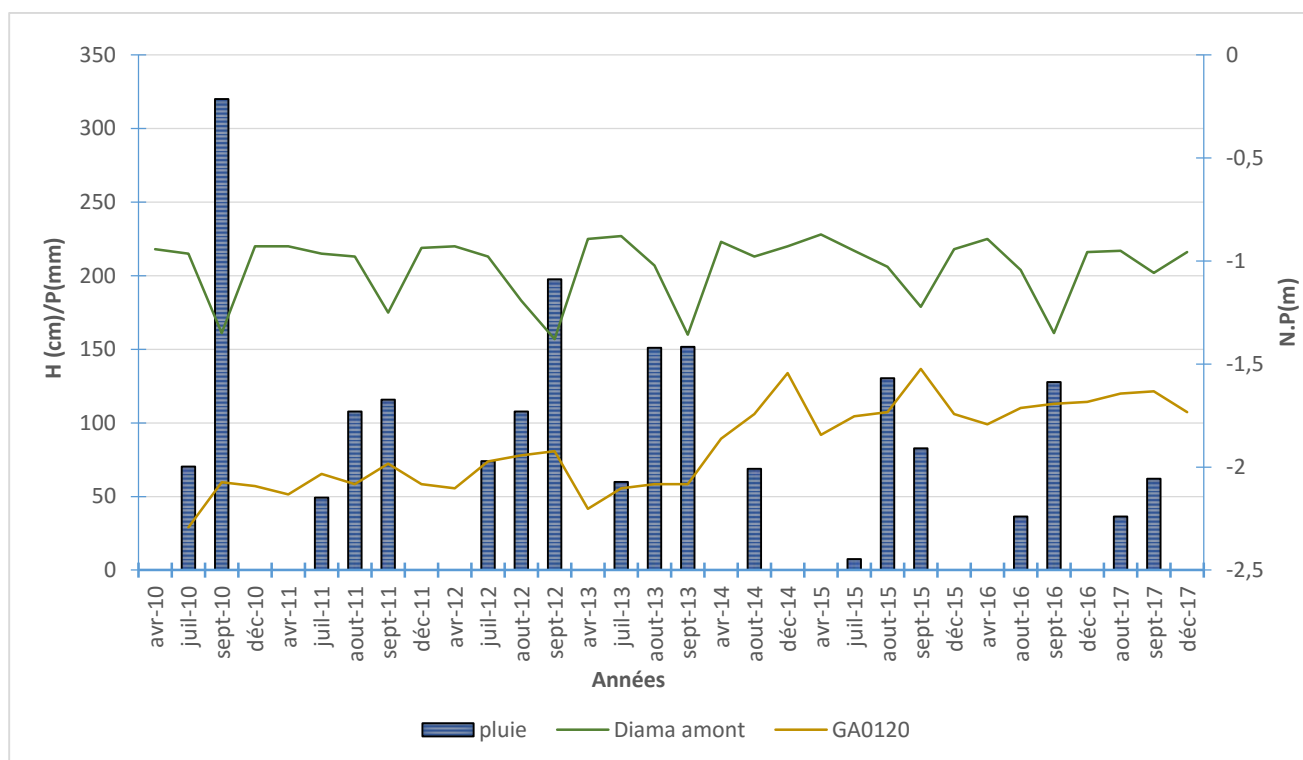
Piézomètres	Nappe	Profondeur (m)	Cours d'eau (c .e)	Elévation IGN (m)		Distance au c .e (m)
				repère	base	
GA0002	Nouakchottien	10	Djeuss	3.64	2.36	1800
GA0120	Nouakchottien	5,45	Lampsar	3.44	2.35	8500

La figure 20 présente l'évolution du niveau de la nappe dans le piézomètre GA0002 situé à 1800 m du Djeuss. L'analyse de cette figure montre que le caractère saisonnier reste perceptible avec de faibles amplitudes du niveau piézométrique (environ 0.1m). Pendant l'hivernage de juillet à septembre, les fluctuations de la nappe sont importantes et évoluent en sens inverse à celles du fleuve (figure 20). Pendant la saison sèche, il est noté une baisse du niveau de la nappe due à une reprise évaporatoire ; par contre le niveau du fleuve est plus élevé durant cette saison. Le maximum pluviométrique correspond au pic de recharge de la nappe.



**Figure 20 : Fluctuations de la nappe en parallèle avec la pluviométrie et le niveau du fleuve au piézomètre GA0002**

Le piézomètre GA0120 installé également loin d'un cours d'eau (à 8500 m de Lampsar) capte la nappe du Nouakchottien soumise à l'influence atmosphérique. L'évolution du niveau de la nappe est similaire à celle décrite précédemment caractérisée par une baisse pendant la saison sèche de novembre à mai et une recharge durant la saison des pluies contrairement à l'évolution de la hauteur du fleuve (figure 21). Au cours de la saison sèche, la baisse significative de la nappe observée est liée à la forte reprise évaporatoire (proximité de la nappe par rapport à la surface du sol). Ceci confirme que la nappe est rechargée par la pluviométrie au niveau des zones éloignées des cours d'eau et se décharge par évaporation.



**Figure 21: Fluctuations de la nappe en parallèle avec la pluviométrie et le niveau du fleuve au piézomètre GA0120**

### III-2 Impact de l'irrigation sur la recharge de la nappe

Pour mettre en évidence, l'impact de l'irrigation sur la nappe alluviale du delta, les piézomètres GA0054, GA0071, et GA0072 implantés à l'intérieur des périmètres hydro-agricoles et loin des cours d'eau (tableau 4) ont été utilisés afin de minimiser l'impact du fleuve sur la nappe. Pour cela, nous avons réalisé une corrélation entre le niveau piézométrique et la pluviométrie mensuelle mesurée à la station de Saint-Louis

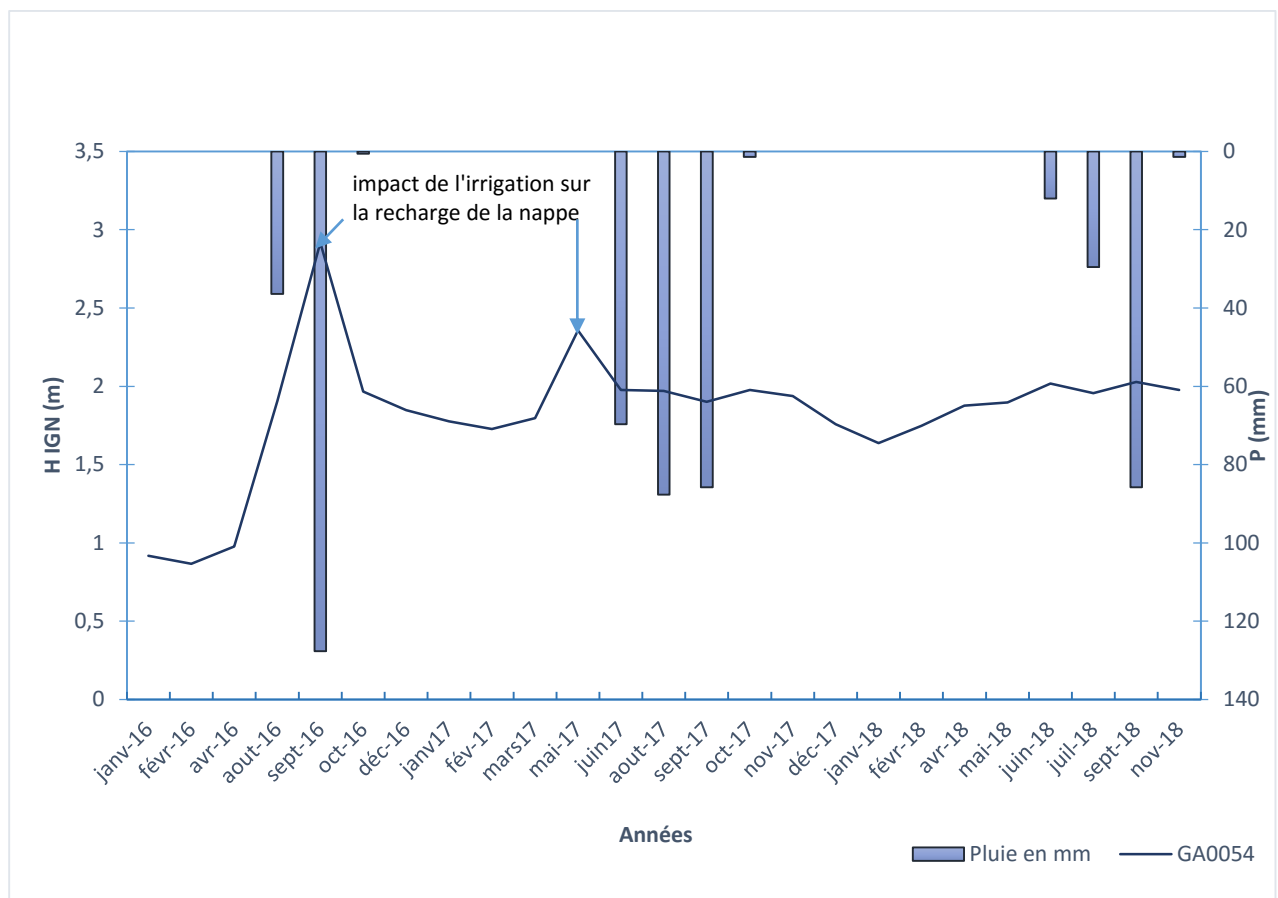
**Tableau 4 : Caractéristiques des piézomètres du groupe 3**

Piézomètres	Nappe	Elévation IGN (m)		Cours d'eau (c.e)	Distance au c.e (m)	Profondeur (m)
		repère	base			
GA0054	Inchirien	2.92	1.90	Fleuve Sénégal	4000	39,5

GA0071	Inchirien	3.03	1.83	Lampsar	1000	19,6
GA0072	Inchirien	3.07	1.76	Lampsar	1000	11,5

➤ Impact de la riziculture sur la recharge de la nappe

Le piézomètre GA0054 localisé à 4000 m du fleuve dans le périmètre de Boundoum capte la nappe de l'Inchirien. La courbe d'évolution de la nappe dans ce piézomètre est représentée par la figure 22. L'analyse de cette figure permet d'identifier deux phases de recharge de la nappe. Une première période de recharge est observée pendant l'hivernage (juillet à septembre/octobre), le niveau de la nappe remonte progressivement avec des amplitudes allant jusqu' à 2,9 m. En effet, la recharge de la nappe par les eaux de pluie est négligeable du fait de la faiblesse des précipitations. Puisque la campagne rizicole hivernale est pratiquée dans ce périmètre de juillet à novembre, on peut en déduire que la recharge de la nappe provient essentiellement de l'activité agricole. Une recharge supplémentaire est enregistrée, elle débute au mois de février/mars et se termine à mai; coïncidant à la période de campagne de contre saison chaude (février à juillet). La nappe se décharge à l'arrêt de l'irrigation de décembre à janvier. De ce constat, on peut conclure que la nappe se recharge par l'apport des eaux d'irrigation au niveau des piézomètres situés loin des cours d'eau et proches des périmètres irrigués.



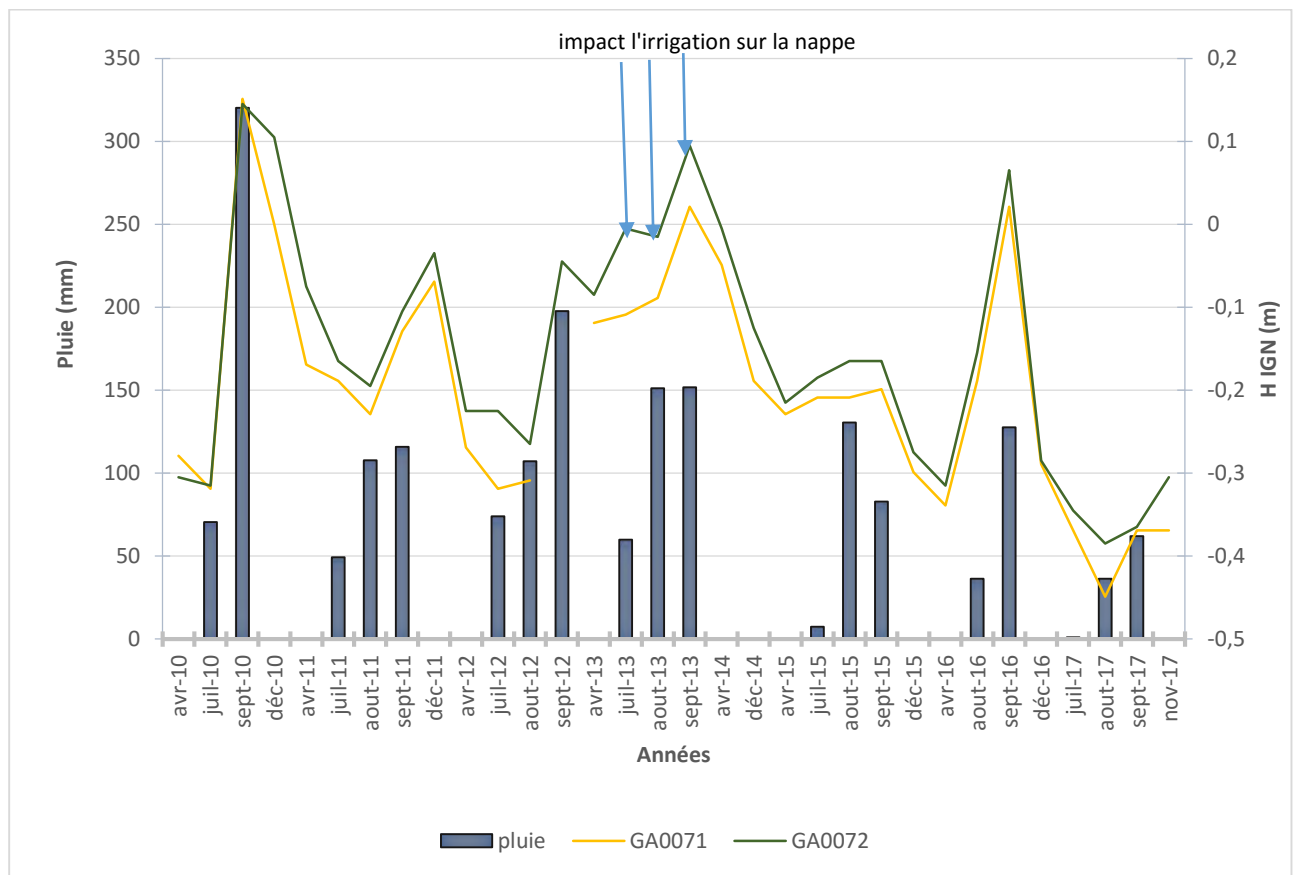
**Figure 22 : fluctuations de la nappe au niveau du piézomètre GA0054 en parallèle avec les Précipitations**

➤ Impact des autres cultures irriguées sur la recharge de la nappe

Les piézomètres GA0071 et GA0072 placés côte à côte sont localisés dans un périmètre irrigué villageois de l'ISRA (Institut Sénégalais de Recherches Agricoles) et sont distants de 1000 m du Lampsar. Y sont pratiquées les cultures classiques comme l'arachide et l'arboriculture (Ngom, 2013).

Les fluctuations de la nappe dans ces piézomètres montrent les mêmes allures. Entre avril 2010 et septembre 2017, la nappe est caractérisée par des variations très irrégulières traduisant une influence de l'irrigation au cours de la saison sèche (figure 23). Les amplitudes de variations du niveau de la nappe sont constituées par des phases de décharge caractérisées par des amplitudes très faibles suivies par des phases de recharge dont l'amplitude maximale ne dépasse pas 15 cm. La recharge de la nappe est donc plus importante pendant la riziculture

(voir figure 22) où l'amplitude des fluctuations peut atteindre plus de 2m pendant les périodes de culture



**Figure 23 : fluctuations de la nappe en parallèle avec les précipitations mesurées au GA0071 et GA0072**

### III-3 Relation entre nappes

Dans cette partie nous avons étudié le comportement de la nappe en zones aménagées et proches d'un cours d'eau (groupe 3). Pour se faire, des piézomètres qui captent le compartiment inférieur (GA0066) et le compartiment supérieur (GA0067 et GA0068) ont été choisis afin d'établir la relation entre la nappe du l'Inchirien et celle du Nouakchottien. Les courbes des fluctuations du niveau piézométrique sont représentées dans la figure 24. L'analyse des courbes a permis de distinguer deux périodes d'évolution du niveau des nappes : de 1987 à 1991 et de 1997 à 2017. Les données de la première période montrent une baisse importante du niveau de la nappe dans le compartiment supérieur traduisant une forte reprise évapo-transpiratoire (proximité de la nappe par rapport à la surface du sol) et les

fluctuations piézométriques oscillent entre -2,2 m et -3,8 m; par contre dans le Ga0066, le niveau piézométrique est supérieur à -1 m tout en conservant leur caractère saisonnier (succession de recharge et de décharge). La période de recharge de la nappe se situe entre juillet à novembre ensuite le niveau de la nappe baisse progressivement de mai jusqu'au mois de juin. On constate ainsi que la recharge de la nappe coïncide à la période de crue du fleuve et la décharge survient à l'étiage ;

Au cours de la deuxième période, les niveaux piézométriques sont plus importants par rapport à la première période au sein des deux compartiments. La période de recharge est observée de juillet à octobre suivie d'une baisse entre décembre et juin. Les courbes montrent une similarité au niveau de ces trois piézomètres (figure 24). Cette similarité est due à la communication hydraulique entre les deux nappes puisque la nappe de l'Inchirien est semi captive par endroit, du fait de la discontinuité de la couche d'argile à son sommet (Da Boit, 1993 ; Ngom, 2013; Gning, 2015).

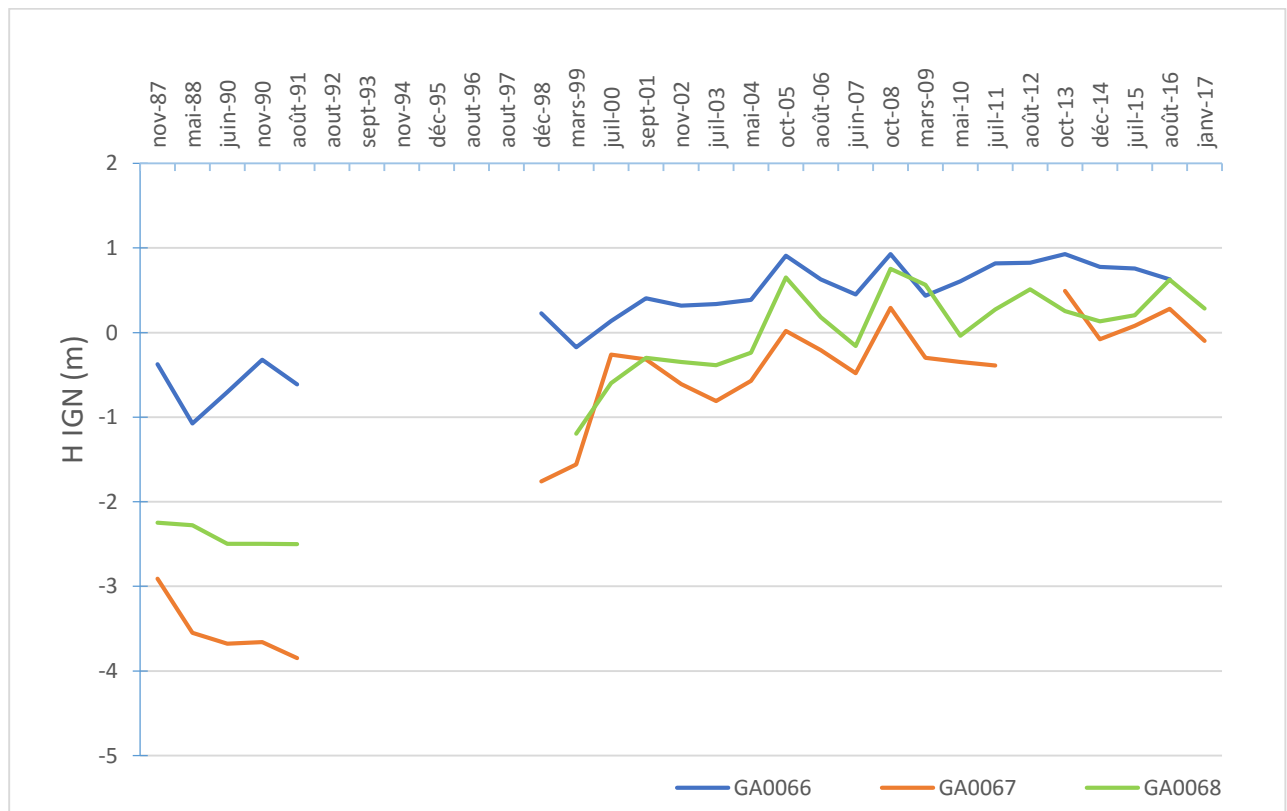


Figure 24 : relation entre nappes

## CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

Il ressort de cette étude que la dynamique de la nappe dans le delta du fleuve Sénégal reste un phénomène complexe et non uniforme. Les analyses des fluctuations du niveau piézométrique ont montré que la nappe est influencée par trois facteurs ; la gestion du barrage de Diama, la pratique de l'irrigation en particulier la riziculture et le climat (pluviométrie et évaporation). L'influence de chacun de ces facteurs dépend de la position géographique du piézomètre étudié. L'impact de la gestion du barrage a été illustré par les piézomètres proches des cours d'eau et hors aménagements. L'analyse des fluctuations piézométriques a montré que celles-ci suivent les mouvements des eaux de surface. En effet, la gestion haute du plan d'eau en 1992 a eu comme conséquence une recharge importante de la nappe alluviale. Cet impact est fonction de la distance du piézomètre par rapport au cours d'eau.

Les suivis des piézomètres implantés à l'intérieur des aménagements hydro-agricoles ont permis de mettre en évidence l'influence de l'irrigation sur la recharge de la nappe. Au droit de ces piézomètres, les fluctuations de la nappe sont liées aux périodes de la mise en eau des parcelles.

Dans les zones éloignées des cours d'eau et hors aménagements agricoles, la recharge de la nappe se fait essentiellement par infiltration des eaux de pluie et la décharge par évaporation au cours de la saison sèche. La reprise évaporatoire étant plus importante que la recharge du faible de la faible pluviométrie, il se produit une baisse inter annuelle du niveau piézométrique de la nappe.

Au terme de cette étude, nous suggérons les recommandations suivantes :

- Continuer les suivis des piézomètres de manière régulière afin d'obtenir des informations complètes et suffisantes sur l'étendue du delta
- Mettre en place des piézomètres complémentaires afin d'obtenir une bonne couverture géographique de la zone, ce qui permettrait de bien caractériser l'hydrodynamique de la nappe

- Renforcer le drainage profond des parcelles aménagées afin de rabattre la nappe salée à l'origine de la salinisation des périmètres aménagés
- Procéder à une sensibilisation de la population sur l'importance des piézomètres

## BIBLIOGRAPHIE

- Audibert, M. 1970. Delta du Fleuve Sénégal : étude hydrogéologique. Projet AFR-REG61, rapport de mission, Saint-Louis
- Ba, K. 2013. Apport de la télédétection et des SIG dans l'étude de l'évolution de la langue de Barbarie et de l'estuaire du fleuve Sénégal. Thèse de doctorat géologie. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 37p
- BDD SAED. 1998. Base de données pour le suivi des piézomètres de la rive gauche du fleuve Sénégal
- Boivin P, Favre P, Maeght J.L.1998. Les sols de la moyenne vallée du fleuve Sénégal : caractéristiques et évolution sous irrigation. ORSTOM, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 237p
- Bonneau, M.2000. Besoins en eau de l'agriculture irriguée et de l'agriculture de décrue dans la Vallée du fleuve Sénégal, 8 p
- Camara, A.2018. Dynamique de l'occupation du sol et caractérisation de la chimie des eaux dans le delta du fleuve Sénégal, mémoire de Géosciences, FST, UCAD, p 35-39
- Cissé, A.2008. Evolution des ressources en eau dans le delta du fleuve Sénégal : influence du climat et des infrastructures hydrauliques. Mémoire de D.E.A de géologie appliquée mention Hydrogéologie. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, FST, p 47-60
- Cissé, B.2007. Le grand projet d'émissaire de drainage des périmètres irrigués du delta du fleuve Sénégal, 1p
- Cissé, B.2011. Les eaux de drainages des périmètres irrigués du delta du fleuve Sénégal système d'évacuation et qualités des eaux. Thèse de Doctorat 3<sup>ème</sup> cycle, département de Géographie, Université de Dakar ,36 p
- Diagana, A.1994. Etudes hydrogéologiques dans la vallée du fleuve Sénégal de Bakel à Podor : relations eaux de surface et eaux souterraines. Thèses 3<sup>ème</sup> cycle Géologie Univ.Cheikh Anta Diop de Dakar, p 22-24
- Diallo, I. 1998. Contribution à l'étude d'une zone humide marginale du Delta du fleuve Sénégal. Mémoire de géographie. Université Gaston Berger de Saint-Louis, p 33-34

- Diao, S. M. 1992. Etude des aquifères de la vallée du fleuve Sénégal (secteur Rosso-Dagana-Lac de Guiers). Mémoire de D.E.A. Département géologie/UCAD ,5p
- Diaw, M.2008. Approches hydro chimique et isotopique de la relation eau de surface/nappe et du mode de recharge de la nappe alluviale dans l'estuaire et la basse vallée du fleuve Sénégal. Thèses 3<sup>ème</sup> cycle d'hydrogéologie. FST. UCAD, p 74- 85
- Diélé ,O. 2006. Maintenance des aménagements hydroagricoles dans le Delta du Fleuve Sénégal : le cas du périmètre Boundoum, maitrise de mémoire, Université Gaston Berger de Saint –Louis, p 50-55
- Diène, R.S.1998. Riziculture et dégradation des sols de la vallée en simple et double riziculture. Thèses 3<sup>ème</sup> cycle hydrogéologie. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, FST, p 79-80
- Fall, S. 2005: la problématique de la gestion de l'eau à l'échelle des périmètres irrigués du delta du fleuve Sénégal. Mémoire de maitrise, Université Gaston Berger de Saint – Louis, 21p
- Gaye, Y.2017. Evolution piézométrique et caractérisation hydro chimique de la nappe alluviale de 2011 à 2014 dans les périmètres irrigués du bas Delta. Mémoire de master hydrogéologie. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, FST, p 22-27
- Gning, A. 2015. Etude et Modélisation Hydrogéologique des Interactions Eaux de Surface/Eaux Souterraines dans un Contexte d'Agriculture Irriguée dans le Delta du Fleuve Sénégal. Thèse de Doctorat. Université Cheikh Anta DIOP de Dakar/Université de Liège, p64-66
- Kaly, E .2018. Gestion de la lame d'eau apportée en agriculture irriguée dans le delta du fleuve Sénégal. Thèses 3<sup>ème</sup> cycle de physiologie. FST. UCAD ,16p
- Kamara, S .2014. Développements hydrauliques et gestion d'un hydro système largement anthropisé : le Delta du Fleuve Sénégal. Thèses 3<sup>ème</sup> cycle. Université d'Avignon et des pays du Vaucluse et Université Gaston Berger de Saint-Louis, p .54-57
- Le Brusq J.Y, Loyer J.Y.1982 : évolution de la salinité des sols et des eaux en relation avec la riziculture submergée dans le Delta du fleuve Sénégal. Centre O.R.S.T.O.M de DAKAR

- Loyer.J.Y.1989. Les sols salés de la basse vallée du fleuve Sénégal : caractérisation, distribution et évolution sous cultures. Editions de l'ORSTOM: Collections Etudes et Thèses Paris, 12p
- Malou, R.2004. Impact du climat sur les ressources en eau souterraine en zone soudano sahélienne. Thèses de 3<sup>ème</sup> cycle d'hydrogéologie. FST. UCAD, 152 p
- Mean, A .2010. Caractérisation hydrogéologique du delta du fleuve Sénégal. Mémoire géologie. Université de Liège, p 7-8
- Michel, P.1973.Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie : étude géomorphologique, mémoire ORSTOM n 63, p752
- Michel P, Barusseau J.P, Richard J.E, Sall M 1993. L'après barrage dans la vallée du Sénégal : modifications hydrodynamiques et sédimentologiques conséquences sur le milieu et les aménagements. Résultats des travaux du projet C.A.M.P.U.S 1989-1992, p 22-28
- Nazoumou, Y. 2002. Impact des barrages sur la recharge des nappes en zone aride : étude par modélisation numérique sur le cas de Kairouan (Tunisie centrale). Thèse de doctorat en génie hydraulique. Université Nationale d'Ingénieurs de Tunis, 62p
- Ndiaye K, Sankharé A, Salha M .2012. Etude hydrogéologique, hydrologique et hydro chimique dans la zone du delta et de la vallée du fleuve Sénégal. Rapport de terrain. Université Cheikh Anta Diop de Dakar, FST, p 4-5
- Ndiaye, N.2013. Etude d'impacts potentiels de l'émissaire du delta, mémoire de master, UGB de Saint-Louis 16-18 p
- Ngom F.D, Dacosta H, Diaw M, Malou R, Akpo L.E.2008. Impact des aménagements hydro agricoles sur les ressources en eau du delta du fleuve Sénégal, p 5-10
- Ngom, F.D.2013. Variabilité climatique au Sénégal et évolution des ressources en eau dans le delta du fleuve Sénégal sous l'influence anthropique. Thèse de Doctorat. UCAD de Dakar., 118, 127p.
- OMVS/USAID .1990. Rapport de synthèse hydrogéologique du delta du fleuve Sénégal Projet eaux souterraines (PES) ,11p
- Rapport de synthèse –version provisoire 1998 : impact de la gestion des ouvrages et des eaux de surface du fleuve Sénégal sur la dynamique des eaux souterraines. Tome 5.4 ,12p

- SAED.1993. Les sols du delta du fleuve Sénégal. Bulletin technique n°8. Projet gestion de l'eau Coopération Scientifique KU Leuven-SAED, p 1-2
- SAED/DPDR. 1998. Suivi des piézomètres dans le delta du fleuve Sénégal. Bulletin technique n°15. Projet gestion de l'eau Coopération Scientifique KU Leuven-SAED, 4-15p
- SAED.2009. Recueil statistique de la vallée du fleuve Sénégal
- Sall, M.2006. Crue et élévation du niveau marin à Saint-Louis du Sénégal : impacts potentiels et mesures d'adaptation, thèse de doctorat géographie, 120p
- Saos J, Diagana A, Thiebaux J.1993. Relations eaux de surface eaux souterraines dans la vallée alluviale du fleuve Sénégal. Rapport de synthèse tome 4, EQUESSEN, p 27-28
- Seye, M.2005.modélisation hydrodynamique de la nappe alluviale du Delta du Fleuve Sénégal : impact de l'irrigation sur le relèvement de la nappe salée dans les casiers rizicoles (Projet GORE –DELTA), UCAD, 5p
- Touré, M. 2009. Inventaire des réseaux pluviométriques et base de données dans le delta du fleuve Sénégal. Mémoire de master géographie. Université Cheikh Anta DIOP, 12p
- Touzi, S.1998. Formalisation des échanges fleuve-nappe en présence des zones d'inondation : cas de la régularisation des crues du fleuve Sénégal. Mémoire DEA. Sciences de l'eau dans l'environnement continental. ORSTOM/ENGREF p 12-14

## ANNEXES

### Relevés piézométriques de 2010 (source SAED)

			12/04/10	13/04/10	19/05/10	15/07/10	30/09/10	30/10/10	30/11/10	30/12/10
Ouvrages	X(m)	Y (m)	Niveau piézométrique (m)							
GA0002	357600	1791100	-0,334	-0,334	-0,364	-0,314	0,116	0,136	0,116	-0,004
GA0006	353900	1794100	1,338	1,338	0,848	1,518	1,338	1,318	1,668	1,508
GA0023	351700	1792800	0,966	0,966	1,306	1,606	1,426	1,386	1,416	1,426
GA0054	386500	1817500	Pas suivi	Pas suivi	Pas suivi	Pas suivi	Pas suivi	Pas suivi	Pas suivi	Pas suivi
GA0066	378700	1815600	0,647	0,647	0,607	-	-	-	-	-
GA0067	378700	1815600	-0,449	0,449	0,349	-	-	-	-	-
GA0068	380200	1814900	-0,067	-0,067	-0,037	-	0,113	0,503	-	0,833
GA0071	358200	1784300	-0,279	-0,279	-0,369	-0,319	0,151	0,161	0,151	0,181
GA0072	358200	1784300	-0,305	-0,305	-0,405	-0,315	0,145	0,155	0,085	0,105
GA0120	390300	1806800	-	-	-	-2,293	-2,073	-2,063	-2,063	-2,093

Relevés piézométriques de 2011 (source SAED)

			31/03/11	15/04/11	16/05/11	1/07/11	16/08/11	19/09/11	17/10/11	15/11/11	30/12/11
Ouvrages	X(m)	Y (m)	Niveau piézométrique (m)								
GA0002	357600	1791100	-0,104	-0,084	-0,134	-0,164	-0,114	-0,114	-0,064	-0,114	-0,214
GA0006	353900	1794100	1,488	1,418	1,418	1,368	1,338	1,218	1,408	1,418	1,358
GA0023	351700	1792800	1,406	1,416	1,386	1,406	1,406	1,296	1,386	1,386	1,336
GA0054	386500	1817500	Pas suivi	-	-	-	2,317	2,377	2,497	2,517	2,377
GA0066	378700	1815600	0,977	0,937	0,937	0,837	0,797	0,877	0,917	0,927	0,847
GA0067	378700	1815600	-0,229	-0,289	-0,239	-0,379	-0,409	0,111	0,291	-	-
GA0068	380200	1814900	0,183	0,183	0,193	0,303	0,403	0,403	0,433	0,453	0,223
GA0071	358200	1784300	-0,009	-0,119	-0,179	-0,209	-0,189	-0,159	-0,099	-0,109	-0,049
GA0072	358200	1784300	-0,065	-0,115	-0,145	-0,185	-0,135	-0,135	-0,085	-0,125	-0,025
GA0120	390300	1806800	-2,183	-2,193	-2,113	-2,083	-1,993	-	-1,763	-1,913	-1,983

### Relevés piézométriques de 2012 (source SAED)

			16/01/12	1/02/12	13/03/12	19/04/12	30/05/12	16/07/12	28/08/12	19/09/12	15/11/12
Ouvrages	X(m)	Y (m)	Niveau piézométrique (m)								
GA0002	357600	1791100	-0,224	-0,224	-0,244	-0,264	-0,284	-0,264	-0,144	-0,024	-0,114
GA0006	353900	1794100	1,368	1,358	1,338	1,358	1,338	1,308	1,268	1,188	1,058
GA0023	351700	1792800	1,356	1,356	1,336	1,356	1,376	1,316	-	1,206	1,086
GA0054	386500	1817500	2,327	2,297	2,317	2,397	2,427	2,347	0,957	0,817	1,137
GA0066	378700	1815600	0,827	0,837	0,757	0,747	0,727	0,857	0,827	-	0,857
GA0067	378700	1815600	Pas suivi	Pas suivi	Pas suivi	Pas suivi	Pas suivi	Pas suivi	Pas suivi	Pas suivi	Pas suivi
GA0068	380200	1814900	0,143	0,053	0,073	0,063	0,173	0,123	0,513	0,573	0,153
GA0071	358200	1784300	-0,009	-0,089	-0,249	-0,269	-0,289	-0,319	-0,309	-0,689	-0,259
GA0072	358200	1784300	0, 025	-0,085	-0,205	-0,225	-0,225	-0,225	-0,265	-0, 045	-0,215
GA0120	390300	1806800	-2,143	-2,043	-2,093	-2,103	-2,063	-1,973	-1,943	-1,923	-1,873

## Relevés piézométriques de 2013(source SAED)

			14/01/13	7/03/13	10/04/13	11/05/13	5/06/13	3/07/13	20/08/13	9/10/13	11/12/13
Ouvrages	X(m)	Y (m)	Niveau piézométrique (m)								
GA0002	357600	1791100	-0,174	-0,174	-0,464	-0,484	-0,524	-0,514	-0,114	-0,014	-0,234
GA0006	353900	1794100	1,348	1,408	1,138	1,178	1,118	1,138	2,188	1,088	1,258
GA0023	351700	1792800	1,286	1,346	1,366	1,386	1,356	1,376	1,506	1,576	1,526
GA0054	386500	1817500	0,947	0,927	2,377	2, 357	1,067	1,007	-	-	1,037
GA0066	378700	1815600	0,797	0,747	0,757	0,797	0,787	-	-	0,927	0,847
GA0067	378700	1815600	-	-	Pas suivi	0,111	0,241	0,341	Pas suivi	0,491	-0,089
GA0068	380200	1814900	-0,097	-0,197	-0,057	0,083	0,173	0,263	-	0,253	0,163
GA0071	358200	1784300	-0,369	-0,329	-0,119	-0,109	-0,109	-0,109	-0,089	0,081	-0,059
GA0072	358200	1784300	-0, 365	-0,295	-0,085	-0,045	-0,025	-0,005	-0,015	0, 135	-0,015
GA0120	390300	1806800	-1,943	-1,963	-2,203	-2,183	-2,113	-2,103	-2,063	-2,083	-2,083

### Relevés piézométriques 2014 (source SAED)

			15/01/14	12/02/14	12/03/14	23/04/14	18/06/14	27/08/14	14/10/14	19/11/14	16/12/14
Ouvrages	X(m)	Y (m)	Niveau piézométrique (m)								
GA0002	357600	1791100	-0,284	-0,434	-0,084	-0,114	-0,114	-0,154	-0,124	-0,174	-0,194
GA0006	353900	1794100	1,218	1,098	1,448	1,428	1,408	1,348	1,388	1,408	1,408
GA0023	351700	1792800	1,486	1,256	1,486	1,486	1,476	1,426	1,416	1,396	1,406
GA0054	386500	1817500	0,917	0,767	-	1,017	0,967	2,917	1,097	1,107	1,217
GA0066	378700	1815600	0,897	-	0,817	0,797	0,827	2,127	-	0,077	0,777
GA0067	378700	1815600	-0,229	-	-0,189	0,201	0,621	2,091	2,091	0,771	-0,079
GA0068	380200	1814900	0,093	-	-0,027	-0,017	-0,027	2,503	2,503	0,233	0,133
GA0071	358200	1784300	-0,049	-0,069	0,041	-0,049	-0,049	-0,189	-0,289	-0,179	-0,199
GA0072	358200	1784300	0, 115	0,125	0,095	-0,005	-0,005	-0,125	-0,265	-0, 095	-0,155
GA0120	390300	1806800	-2,123	-2,263	-1,893	-1,863	-1,803	-1,743	-1,723	-1,713	-1,743

## Relevés piézométriques de 2015 (source SAED)

			12/01/15	16/03/15	18/05/15	15/06/15	20/07/15	17/08/15	14/09/15	12/10/15	21/12/15
Ouvrages	X(m)	Y (m)	Niveau piézométrique (m)								
GA0002	357600	1791100	-0,224	-0,264	-0,264	-0,264	-0,274	-0,224	0,016	0,086	-0,075
GA0006	353900	1794100	1,378	1,408	1,408	1,358	1,368	1,338	1,268	1,428	1,378
GA0023	351700	1792800	1,396	1,426	1,476	1,476	1,416	1,496	1,446	1,346	1,406
GA0054	386500	1817500	0,817	0,817	1,017	1,067	-	Pas suivi	-	-	0,967
GA0066	378700	1815600	0,697	0,727	0,787	0,797	0,757	-	-	-	0,677
GA0067	378700	1815600	-0,179	-0,249	0,291	0,371	0,081	-	-	-	-0,069
GA0068	380200	1814900	0,053	0,113	0,223	0,273	0,203	Pas suivi	-	-	0,063
GA0071	358200	1784300	-0,269	-0,269	-0,149	-0,119	-0,209	-0,209	-0,199	-0,199	-0,299
GA0072	358200	1784300	-0,235	-0,235	-0,125	-0,105	-0,185	-0,155	-0,165	-0,175	-0,275
GA0120	390300	1806800	-1,793	-	-1,813	-1,783	-1,753	-1,733	-1,723	-1,713	-1,713

### Relevés piézométriques de 2016 (source SAED)

			10/01/16	15/02/16	04/04/16	02/05/16	18/07/16	08/08/16	26/09/16	17/10/16	03/12/16
Ouvrages	X(m)	Y (m)	Niveau piézométrique (m)								
GA0002	357600	1791100	-0,104	-0,144	-0,164	-0,174	-0,264	-0,144	0,086	0,036	-0,044
GA0006	353900	1794100	1,438	1,428	1,368	1,468	1,358	1,468	1,348	1,248	-
GA0023	351700	1792800	1,436	1,436	1,456	1,476	1,476	1,426	0,376	1,326	1,396
GA0054	386500	1817500	0,917	0,867	0,977	Non suivi	Non suivi	1,907	1,817	2,917	2,057
GA0066	378700	1815600	0,647	-0,043	0,707	0,807	-	0,627	Non suivi	0,837	0,797
GA0067	378700	1815600	-0,109	0,551	0,791	0,521	Non suivi	0,281	-	1,051	0,181
GA0068	380200	1814900	-0,007	-0,137	1,183	0,253	-	0,623	Non suivi	0,753	0,723
GA0071	358200	1784300	-0,319	-0,339	-0,339	-0,309	-0,279	-0,189	0,021	0,041	-0,179
GA0072	358200	1784300	-0,295	-0,315	-0,315	-0,275	-0,085	-0,155	0,065	0,065	-0,185
GA0120	390300	1806800	-1,793	-1,803	-1,853	-1,793	-1,773	Non suivi	-1,713	-1,693	-1,673

### Relevés piézométriques de 2017(source SAED)

			16/01/17	20/02/17	20/03/17	20/05/17	12/06/17	17/07/17	14/08/17	18/09/17	13/11/17
Ouvrages	X(m)	Y (m)	Niveau piézométrique (m)								
GA0002	357600	1791100	-0,104	-0,144	-0,164	-0,174	-0,264	-0,144	0,086	0,036	-0,044
GA0006	353900	1794100	1,438	1,318	1,308	Non suivi	1,298	1,258	1,278	1,378	1,378
GA0023	351700	1792800	1,406	1,446	1,496	1,466	1,446	1,436	1,426	1,406	1,416
GA0054	386500	1817500	1,777	1,727	1,797	2,357	1,977	Non suivi	1,97	1,9	1,937
GA0066	378700	1815600	0,767	0,697	0,767	0,827	0,827	Non suivi	0,777	-	0,817
GA0067	378700	1815600	-0,099	-0,219	0,071	0,491	0,511	-	0,211	-	0,271
GA0068	380200	1814900	0,283	0,103	0,053	0,403	0,353	-	0,493	Non suivi	0,093
GA0071	358200	1784300	-0,319	-0,359	-0,309	-0,219	-0,299	-0,369	-0,449	-0,369	-0,369
GA0072	358200	1784300	-0,315	-0,375	-0,295	-0,205	-0,275	-0,345	-0,385	-0,365	-0,295
GA0120	390300	1806800	-1,723	-1,763	-1,773	-1,713	-1,683		-1,643	-1,633	-1,613