

Dégradation chimique des sols dans les systèmes de production du Sénégal: analyse des cas du Haut Saloum, du delta du Sénégal et du Gandiolais

Dr Souleymane **NIANG**, Laboratoire Leïdi «DTD», ED des Sciences de l'Homme et de la Société (SHS), Université Gaston BERGER (UGB). Dr Tégaye **DIOP NIANG**, Laboratoire Leïdi «DTD», ED des Sciences de l'Homme et de la Société (SHS), Université Gaston BERGER (UGB). Dr Cheikh Ahmed Tidiane **FAYE**, Laboratoire Leïdi «DTD», ED des Sciences de l'Homme et de la Société (SHS), Université Gaston BERGER (UGB). Contact: niangsouleymane87@gmail.com

Résumé

Au Sénégal, les espaces littoraux et estuariens sont les plus affectés par la salinisation à cause de l'héritage des transgressions marines notamment, des diverses pressions anthropiques actuelles et les effets du changement climatique.

Le Haut Saloum, l'espace deltaïque du fleuve Sénégal et le Gandiolais présentent des niveaux de minéralisation qui expriment une salinité excessive des sols ou des eaux d'irrigation. Si les deux premiers milieux sont marqués par une salinisation importante des terres cultivables, le Gandiolais est principalement déterminé par une salinité très prononcée de la réserve souterraine due aux impacts des aménagements dans l'estuaire du fleuve Sénégal.

L'objectif de cet article est de caractériser la salinité dans ces systèmes de production en mettant en évidence les niveaux de concentration ionique.

L'approche méthodologique a consisté à l'échantillonnage des sols et des eaux, aux traitements de laboratoire et à la cartographie exhaustive de la dynamique saline.

Les résultats ont attesté une dégradation progressive des sols dans les systèmes de production, notamment du Delta du fleuve Sénégal où le drainage fait défaut dans les aménagements privés et publics non adéquat mais également la transformation des terres de culture en tannes dans le Haut Saloum. L'eau principalement dans le Gandiolais où la nappe des sables quaternaires est la principale source d'irrigation sur la bande des Niayes est sensiblement affectée par la salinisation.

Mots clés: dégradation, delta, Gandiolais, Haut Saloum, salinisation, systèmes de production.

Abstract

In Senegal, littoral and estuarine areas are the most affected by salinization because of the legacy of marine transgressions, the various current anthropogenic pressures and the effects of climate change. Upper Saloum, the delta area of the Senegal River and Gandiolais have mineralization levels that express excessive salinity of soils or irrigation water. If the first two environments are marked by significant salinization of arable land, the Gandiolais is mainly determined by a very pronounced salinity of the underground reserve due to the impacts of developments in the estuary of the Senegal River.

The purpose of this paper is to characterize salinity in these production systems by bringing out ion concentration levels.

The methodological approach consisted of soil and water sampling, laboratory treatments and exhaustive mapping of saline dynamics.

The results showed a gradual deterioration of soils in the production systems, particularly in the Senegal River Delta, where drainage is lacking in private and public facilities that are not adequate, but also in the transformation of cultivated lands into tanns in the Upper Saloum. Water mainly in the Gandiolais where the groundwater of the quaternary sands is the main source of irrigation on the Niayes band is significantly affected by salinization.

Keywords: degradation, delta, Gandiolais, upper Saloum, salinization, production system.

Introduction

La salinisation des sols au Sénégal est une des contraintes les plus sévères dans les systèmes de production. Au Sénégal l'origine des sels qui affectent les sols et les eaux des nappes phréatiques est essentiellement marine (SADIO, 1991). Elle résulte des différentes phases climatiques qui se sont succédées au Quaternaire notamment la transgression nouakchottienne (22 000-12 000 ans BP). Malgré les phases humides qui ont suivi, les sols sont donc restés salés, même si la salinité est demeurée nettement inférieure à celle que l'on connaît actuellement.

La salinisation dite «secondaire» due aux mauvaises pratiques d'irrigation (RICHARDS, 1954; CHAPMAN et KIMSTACH, 1966; RAHEJA, 1966; ARAR, 1972; ELGABALY, 1972; FAO, 1978; BRESLER et *al.*, 1982) n'est observée que dans les périmètres irrigués du delta et de la vallée du fleuve Sénégal (LE BRUSQ, 1984).

Cette salinisation affecte plus de 1,7 million d'ha au Sénégal (LADA, 2009) sur les 3 800 000 ha de terres cultivables. Cette superficie était estimée environ à 1 million d'ha dans les années 1980 (LOYER, 1989), soit une augmentation de 700 000 ha en moins de 30 ans. SADIO (1991) l'estimait à plus de 1 230 000 ha alors que les résultats de l'Institut National de Pédologie (INP, 2008) donnent un total de surfaces dégradées estimées à 996 947 ha. Ce phénomène est à l'origine de la baisse des rendements agricoles et l'abandon des terres, accentuant la pauvreté en milieu rural.

Dans le Haut Saloum, la salinisation, peu répandue avant les années 1970, a progressé vers les champs au début des années 1980. Ce processus a vite atteint tous les sols, depuis les terrasses basses jusqu'au glacis de raccordement selon trois processus essentiels: la migration verticale des sels par remontée capillaire de la solution du sol ou de la nappe phréatique peu profonde, sous l'action des phénomènes d'évaporation intense due aux températures très élevées (25-40°C) et qui maintiennent pendant 8 à 9 mois un profil salin ascendant; les inondations par les eaux sursalées des cours d'eau, 2 à 3 fois plus salées que l'eau de mer avec 46 ms/cm (SADIO, 1991); l'accumulation des limons salés transportés par les vents, dans les espaces couverts de végétation.

La dynamique saline a entraîné la disparition totale de la mangrove aux abords du fleuve Saloum et a sérieusement affecté les systèmes de production et la productivité agricole. Certaines cultures traditionnelles pratiquées dans la zone de mangrove telles que la riziculture, ou près des tannes ont fortement régressé dans la plupart des terrasses basses, faute de pouvoir les récupérer par les méthodes traditionnelles d'aménagement. Également, les ressources en eau dans le «Haut-Saloum» sont affectées par la salinisation et l'acidification à cause du tarissement des nappes d'eau douce et de la remontée du biseau salé (FAYE, 2011).

La pêche en tant que seconde activité des populations après l'agriculture a fortement diminué à cause de la migration des poissons à la suite de la sursalure du cours d'eau. Parallèlement la superficie des tannes a doublé, voire triplé dans certains secteurs. Les tannes nues à vasières inondées sont devenues de véritables bassins évaporatoires ou précipitent des quantités importantes de sels. Le régime hydrologique a complètement été inversé, avec un écoulement

des tannes vers le plateau. Les chenaux des marées et les affluents se transforment en saumures, deux à trois mois après la saison des pluies (THIAM, 1986).

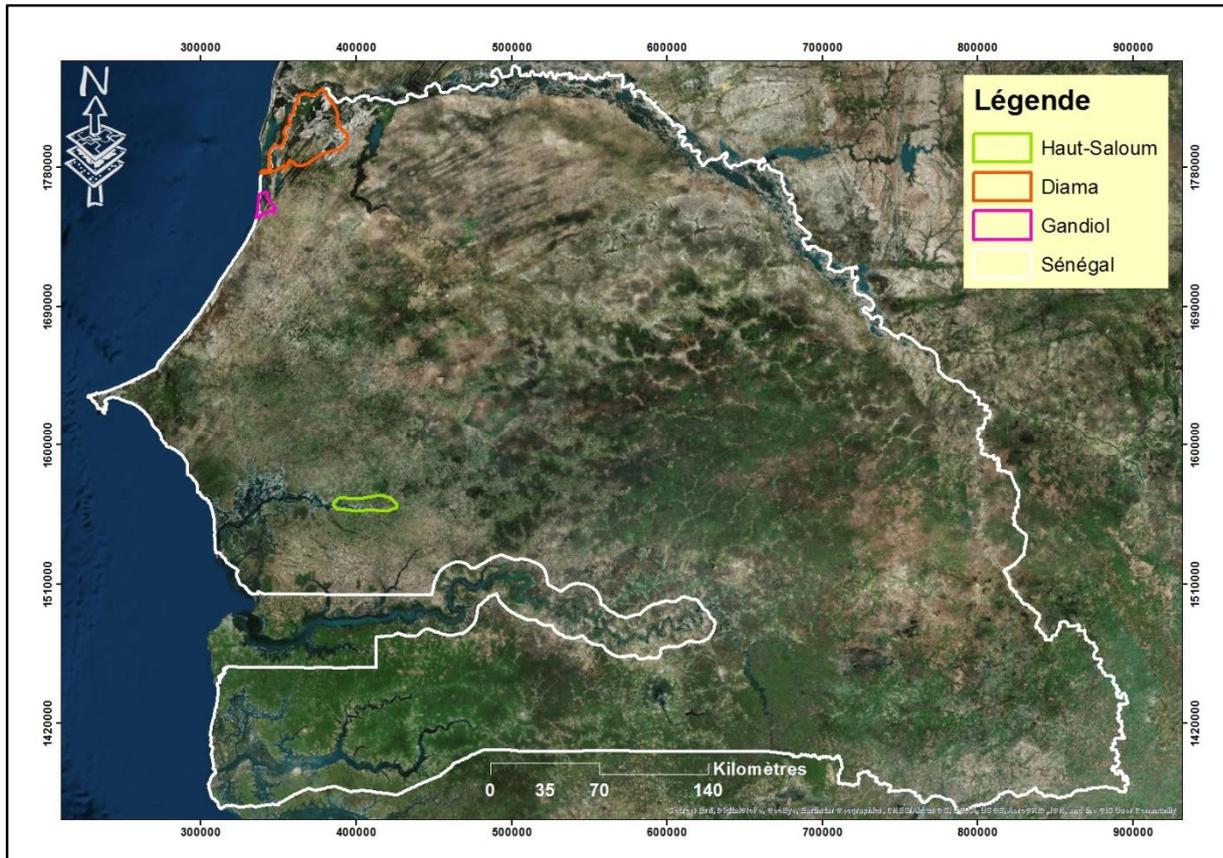
Dans le delta du fleuve Sénégal, la dégradation des terres par salinisation est l'une des plus grandes contraintes auxquelles sont confrontées les populations rurales. La pratique durable de la culture irriguée dans le DFS est sérieusement menacée par la salinisation des terres qui pousse à l'abandon de plusieurs périmètres aménagés (BARBIERO et LAPERROUSAZ, 1999). La transgression nouakchottienne a rendu les terres du Delta et la nappe salées jusqu'à nos jours (sels fossiles). Néanmoins dans les années 1970, les épisodes répétés de sécheresse qui ont entraîné la baisse remarquable du niveau du fleuve Sénégal, ont entamé la seconde phase d'évolution et favorisé la remontée de l'eau salée dans le lit du fleuve à plus d'une centaine de kilomètres de l'embouchure¹. Ce phénomène de remontée est à l'origine de la construction en 1986 du barrage de Diama pour freiner l'intrusion saline et développer l'agriculture irriguée. Cependant l'irrigation a certes des effets positifs avec l'augmentation des rendements des cultures irriguées, mais aussi des effets négatifs à travers la salinisation secondaire en l'absence de drainage efficient, phénomène bien connu dans le Delta et qui ne cesse de prendre de l'ampleur.

En revanche, dans le Gandiolais, la salinisation primaire est étroitement liée à l'évolution de la zone identifiée par une salinité héritée du Nouakchottien² à l'instar du Delta. En effet, il partage avec ce delta la même origine saline fossile mais des différences fondamentales sont observées tant dans les modes de fonctionnement de la salinisation que le matériel lithologique affecté. Si dans le delta, on résonne en termes de sodisation actuelle (NDIAYE, 2009), de remontée de la nappe (GNING, 2015), de dépôts en surface sur des roches argileuses compactes associées à une formation de poudrières salines pouvant affecter les parcelles par transport particulaire. Il faut, toutefois, considérer que le Gandiolais offre un terrain contrasté où on observe une intrusion marine ancienne et actuelle dans un contexte d'exploitation et d'aménagements. Ces milieux sont donc fortement bâtis sur un environnement salin bien qu'ils représentent des pôles de production très importants pour le secteur agricole du Sénégal (figure 1).

¹Guillaumie K. et al. « La sécheresse au Sahel, un exemple de changement climatique » *Atelier Changement Climatique ENPC-Département VET*, 2005, 40 p.

² Le Nouakchottien est un étage du Quaternaire récent. Il correspond au maximum de la transgression Holocène où la mer atteint de +1 à +2,5 m au-dessus du niveau actuel. Au maximum transgressif de cet épisode eustatique (5 500 ans BP), la côte 2,5 m IGN a propagé la mer sur le continent jusqu'à Bogue à 450 km de la côte actuelle.

Figure 1: Localisation des milieux d'étude



La carte de localisation montre que les espaces d'étude se situent le long du littoral qui a été soumis à la transgression du Nouakchottien, justifiant le caractère fossile des sels incorporés dans le matériel du Delta, de la Moyenne vallée et du Haut Saloum. L'approche méthodologique tient compte de ce passé géologique.

1. Méthodologie

La méthodologie repose essentiellement sur l'échantillonnage, l'analyse et l'interprétation des échantillons de sédiments. Ils ont été couplés à des analyses d'eau au laboratoire afin de déterminer la salinité dans les milieux où les nappes sont fortement exploitées.

Dans le Haut Saloum, les prélèvements du sol ont été réalisés au milieu des parcelles, les échantillons des sols ont été recueillis en trois campagnes de terrain. La première campagne s'est déroulée du 1^{er} au 5 mai 2014 avec 69 prélèvements de sédiments, la seconde a eu lieu entre le 2 et le 4 septembre 2014 avec 69 prélèvements de sédiments et la troisième, a eu lieu entre 3 et 9 janvier 2015 avec 95 prélèvements. L'échantillonnage dans les marais salants n'a

concerné que la troisième campagne ce qui explique la variation du nombre d'échantillons de sédiments selon les campagnes (69 à 95 d'une campagne à l'autre).

Dans la partie du delta, le terrain est divisé en plusieurs parcelles (maillage) en respectant les critères d'homogénéité dans les différentes cuvettes ciblées, ensuite prélever plusieurs échantillons dans chacune des parcelles. Pour chaque parcelle, nous avons d'abord, délimité les 4 côtés qui constituent le pourtour de la parcelle, ensuite, tracé les 2 diagonales (D1 et D2) du périmètre ainsi constitué et enfin pris environs 3 points équidistants sur la diagonale D1 en partant du milieu et effectué le même processus pour la diagonale D2.

Dans le Gandiolais, le sol a été prélevé en fin de saison pluvieuse (du 10 au 11 octobre 2015) et en saison sèche (28 au 29 mai 2016). Le contraste saisonnier est favorisé afin d'observer d'éventuelles différences dans les niveaux de concentration des cations et des anions suivant les modifications inter-saisonnières. Il permet également d'apprécier les conséquences de l'irrigation sur la concentration en éléments dissous des sols, autrement, la réaction de conservativité du sol agricole. Dans ce cadre, neuf villages ont été ciblés pour l'échantillonnage afin d'établir le bilan ionique: BountouNdour, NdiébèneGandiol, GadgaLahrar, RimbakhGandiol, Gouye Reine, Gantour, Ndoye Diagne, Pelour 1, Ndeuguette. Les sites de Keur Dièye, de Ngaina et de Ricotte se sont ajoutés aux prélèvements en saison sèche. Dans chaque site de prélèvement, trois points ont été sélectionnés dans les *niayes* et échantillonnés afin d'homogénéiser le prélèvement. L'analyse cible les horizons de surface (0-15 cm et 15-30 cm) qui correspondent au volume racinaire des spéculations en cours: carotte, chou, aubergine, navet, oignon, piment.

Les échantillons d'eau et de sols ont permis de déterminer le pH eau, pH sol, Na^+ , K, Ca, Mg, Cl, SO_4 , HCO_3 , NO_3 qui représentent les faciès chimiques (les anions et les cations dans l'eau d'irrigation et la solution du sol). Le calcium (Ca) et le magnésium (Mg) ont été dosés par volumétrie avec un chélatant; le sodium (Na) et le potassium (K) sont déterminés par la méthode de spectrophotométrie à flamme; le dosage des chlorures a été effectué par titrimétrie (méthode de MOHR). L'alcalinité a été déterminée par la méthode volumétrique. Les carbonates et les bicarbonates sont dosés à l'acide sulfurique non concentré (0,02 N), à une solution de phénophtaléine dans l'alcool à 0,5 % et d'une solution de méthylorange. Les sulfates ont subi un dosage à la solution de NaCl-HCl (10 ml), de chlorure de barrium (1 gramme), de gomme d'acacia (2 ml).

Le traitement a été effectué sur la base de l'approche hydrogéochimique qui repose sur la connaissance du rapport de concentration en ions conservatifs dans les différents échantillons. Les suivis de la salinité sont cartographiés à partir de la méthode d'interpolation spatiale, principalement le krigeage, qui permet de généraliser les niveaux de salinité à partir des points mesurés. Cette méthodologie a permis d'aboutir à des résultats qui permettent de caractériser la salinité dans les trois sites.

2. Résultats

2.1. Résultats des campagnes de suivi de la conductivité électrique et des faciès chimiques dans le Haut Saloum

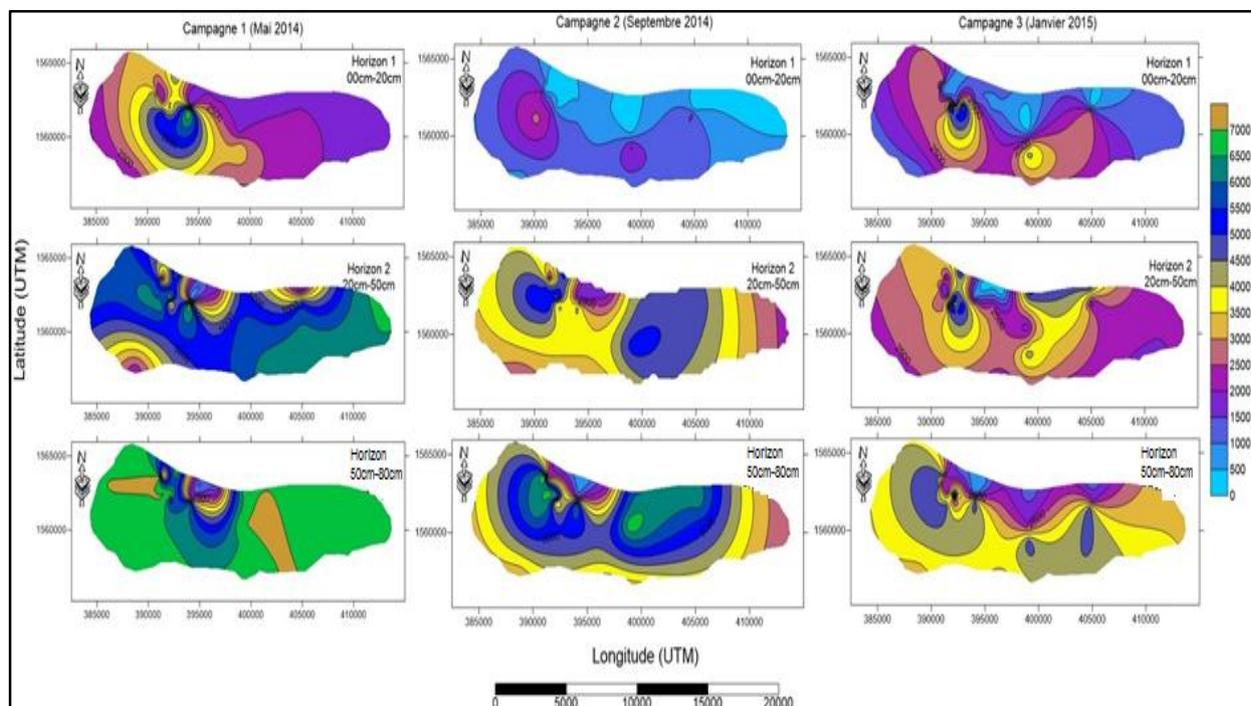
Le chimisme des sédiments des tannes du «Haut-Saloum» est dominé par le faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien (70 %) avec une légère tendance de migration vers le faciès chlorurée sodique. Il n'y a pas de cation dominant et le sulfate chloruré est l'anion dominant (10 %) sur les échantillons des tannes.

Les marais salants sont dominés par le faciès chloruré et sulfaté calcique et magnésien (60 %). Il n'y a pas de cation et d'anion dominant pour ces marais. Mais à partir de 20 jours d'irrigation et pour les marais salants en maturation on note une légère tendance de migration vers le faciès chlorurée sodique (30 à 40 %). Mais contrairement aux premiers nommés, le cation dominant dans ces marais est le sodium et le potassium. Leur niveau de maturation avancée expliquerait ces présences. Le sulfate chloruré demeure toujours l'anion dominant (20 %) sur les marais salants en maturation (figure 2).

Au niveau des sols *Dior* (échantillons de champs agricoles), on note des horizons non salés du fait de leurs faibles valeurs de CE avec une moyenne de 1500 μ s/cm au cœur de la saison sèche. Sur ces sols, la salinité est négligeable et n'aura aucun effet sur le rendement des cultures. Ces sols sont généralement peu salés grâce à leur position topographique plus haute (terrasses hautes et glacis de raccordement) qui favorise le lessivage des sels.

L'augmentation en profondeur de la salinité est due à l'influence de la nappe phréatique salée peu profonde. Par exemple dans le profil de Palado, la nappe est située vers 150 cm et a une conductivité électrique de 1450 μ s/cm.

Figure 2: CE des échantillons de 3 campagnes sur 3 horizons



Au niveau des tannes herbacés (transition entre les tannes nues et les champs agricoles), l’horizon 0-20 cm est peu salé par contre ceux de 20-50 cm et 50-80 cm sont salés avec des CE comprises entre 1500 et 2000 $\mu\text{s}/\text{cm}$.

Au niveau des tannes, les horizons superficiels (0-20 cm) sont extrêmement salés alors que ceux qui sont plus en profondeur de 20-50 et 50-80 cm sont très salés: la salinité varie en en profondeur et selon les saisons. Les tannes sont toutes sursalées mais les horizons de surface et de profondeur sont les plus salés avec des CE de 4000 à 7000 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Cette très forte salinité est due, d’une part à l’inondation par les eaux du fleuve, et d’autre part aux nappes phréatiques hyper salées, situées vers 80-120 cm et dont la conductivité électrique est souvent comprise entre 2500 et 3500 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Durant la saison des pluies, les sols Dior (échantillons de champs agricoles) sont lessivés et présentent de faibles valeurs de CE, inférieures à 750 $\mu\text{s}/\text{cm}$ sur tout le profil.

Les tannes lessivées sur les premiers horizons demeurent salés en profondeur durant l’hivernage. Cette variabilité de la salinité s’explique par la large distribution spatiale de ces sols. Les sols sursalés restent accessibles aux eaux hyper salées du cours d’eau pendant les marées exceptionnelles, alors que les sols moyennement salés ne sont inondés que pendant

l'hivernage par de l'eau salée diluée par les pluies. Dans la plupart des profils la salinité est plus faible entre 15 et 50 cm.

Le faciès chloruré sulfaté sodico-potassique (Na+k, CL) domine sur les tannes et varie entre 5 et 8 mg/L pour les sulfates (SO₄) et de 30 à 100 mg/L pour le reste. Pour les marais salants, le faciès chloruré sulfaté sodi-potassique (Na+k, CL) concerne tous les échantillons et varie entre : varie entre de 50 à 200 mg/L; le faciès sodi-potassique (Na+k) et le faciès sulfaté-sodi-potassique (SO₄-Na+K) y varie respectivement de 90 à 200 mg/L et de 50 à 200 mg/L.

Les différences de CE révélées par les sols et par les horizons d'un même profil mettent en évidence une variation bidimensionnelle: horizontale et verticale de la salinité. Dans le sens vertical, la variation serait liée à la dynamique des remontées capillaires, aux fluctuations de la nappe et à la nature des matériaux du sol. Les différences de CE d'échantillons provenant de divers sols révèlent une grande variabilité spatiale de la salinité. La variation spatiale de la salinité est un phénomène assez courant traduisant une grande dynamique des sels dans les milieux salés (BRESLER et al., 1984; BOIVIN, 1984). Elle est étroitement liée à la succession des unités géomorphologiques. C'est ainsi que tous les sols situés dans les terrasses basses et moyennes inondables par les eaux du fleuve sont caractérisés par une forte salinité exprimée par des CE, nettement supérieures à 2000 $\mu\text{s/cm}$, alors que ceux des terrasses hautes et du glacis de raccordement ne sont affectés de manière significative par la salinité qu'en profondeur.

Durant la saison sèche, la salinité augmente progressivement du mois d'octobre au mois de juin où elle atteint son maximum (7400 $\mu\text{s/cm}$). Par contre pendant la saison des pluies la recharge hydrique du sol provoque la diminution de la salinité par dilution de la concentration des sels qui sont lessivés en profondeur ou hors du système. Le lessivage du sol dépend non seulement de la texture du matériau, mais surtout de la salinité atteinte à la fin de la saison sèche.

Le principal enseignement que met en évidence cette étude physico-chimique est la diversité des sols dont les caractéristiques morphologiques et chimiques semblent être étroitement liées à leur position topographique et à la dynamique du réseau hydrographique.

À chaque unité géomorphologique semble correspondre un type de sol et une végétation caractéristiques. Seules les caractéristiques morphologiques et physico-chimiques permettent

de discriminer les grands types de sols. Il ne semble pas exister de types de matériaux caractéristiques d'une unité ou d'un type de sol donné.

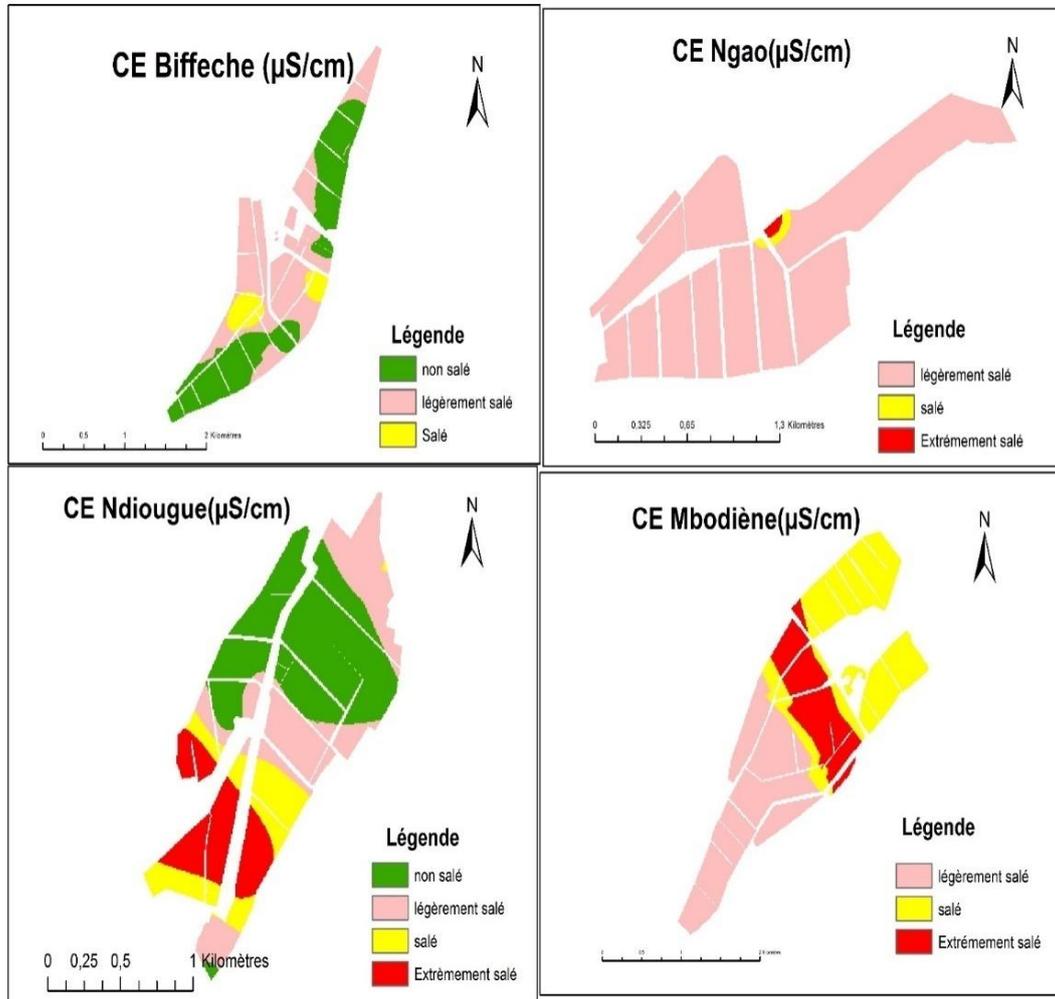
Toutefois on peut dire que les matériaux sableux caractérisent les sols des tannes à végétation arbustive et herbacée sur glacis de raccordement et sur terrasses moyennes, alors que les matériaux limoneux se rencontrent surtout dans les marais salants. La variation de la salinité est étroitement liée à celle de la topographie qui fait que les sols sur terrasses basses soient plus salés (tendance accumulative) que ceux des terrasses hautes, malgré leur localisation près des cours d'eau sursalés.

Grâce à leur position topographique et à la texture plus ou moins sableuse qui permet une bonne infiltration des eaux des pluies, les sols sur glacis de raccordement et des terrasses moyennes se dessalent dans la partie supérieure du profil sur une épaisseur de plus de 60 cm pendant l'hivernage. L'acidité affecte tous les sols des terrasses moyennes et basses et des glacis de raccordement, généralement depuis la surface. Les conséquences de cette évolution se manifestent par des processus pédogénétiques caractéristiques de chaque milieu pédoclimatique. Ces variations verticales et horizontales saisonnières de la salinité sont responsables du processus de salinisation du sol du « Haut-Saloum.

2.2. Résultats des suivis dans le Delta du fleuve Sénégal

La rive droite du fleuve Sénégal est un aménagement de la SAED où l'entrée et la sortie de l'eau sont maîtrisées. Cette bonne gestion de l'eau a permis de contrôler la forte salinité qui existe dans le delta, les résultats de la cartographie permettent de faire un suivi sur le niveau de salinité (figure 3).

Figure 3: Cartographie de la Rive droite horizon (0-30)



Dans la cuvette de **Bifèche**, se trouvent des sols hydromorphes lourds aptes pour la riziculture. Ils présentent des caractéristiques favorables à la culture maraîchère et des sols halomorphes pas très étendus dans le casier aptes à la riziculture d'une manière exclusive.

La cuvette présente une faible teneur en sel. La carte indique des poches plus étendues (en vert) et (en rose), la première est non salée à partir de 250 µS/cm, et la deuxième est légèrement salée avec moins de 1,5 mS et une petite poche (en jaune) salée à partir de 3 mS. Cette cuvette est apte à la riziculture car les valeurs n'atteignent pas le seuil de tolérance du riz, soit 4 000 µS.

La cuvette de **Ngaw** dans le delta du fleuve Sénégal supporte des sols halomorphes aptes à la riziculture; ils ont une bonne structure avec un niveau de salinité faible; cette situation est observée dans la majeure partie de la cuvette (en rose) et un peu (en jaune) avec un niveau de salinité inférieur à 1 mS. La pratique de la riziculture doit être mise dans cette cuvette associée à un bon système d'irrigation et de drainage pour éviter sa dégradation. Cependant il y a dans le casier des seuils de tolérance même pour le riz : en teinte rouge avec un niveau de salinité supérieur à 4 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cette partie de la cuvette se trouve non seulement en sa zone basse mais aussi elle est loin du fleuve et des canaux d'irrigation, la gestion de l'eau devient impossible et le drainage s'applique rarement. Cette partie bien que minime risque une dégradation plus sévère si rien n'est fait.

La cuvette de **Mbodiène** supporte des sols hydromorphes, légèrement salés sur la poche (rose) en grande partie, l'argile est présente le long du profil, et la poche (en jaune) est salée n'atteignant pas le seuil de tolérance du riz.

Des sols halomorphes sont aussi observés; ils sont extrêmement salés, une poche (en rouge) avec une dégradation des argiles marquée par une structure poudreuse facilement érodable. Cette forte salinité se justifie par le fait qu'elle se trouve au milieu, dans la partie la plus basse, loin des réseaux d'irrigation et de drainage sans aucune pente.

Dans la cuvette de **Ndiougue**, les sols sont en majorité de type halomorphe, la vocation rizicole est l'aspect le plus net de ce casier. Les sols doivent être améliorés dans le temps à partir du binôme irrigation/drainage. La grande partie de la cuvette est non salée (en vert), puis légèrement salée (en rose), et une poche (en jaune) qui est salée. La poche (en rouge) est extrêmement salée.

Les sols très affectés par la salinité (type halomorphe) sont difficilement rizicultivables malgré leur potentiel agronomique, d'où l'obligation de veiller sur le drainage des parcelles. Il y a des niveaux de tolérance pour le riz (à partir de 3 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), le suivi de l'eau est impératif pour éviter toute baisse de rendement et une dégradation plus sévère qui nécessiteraient davantage d'efforts.

2.3.Résultats de la caractérisation de la salinité dans le Gandiolais

A l'opposé des deux milieux précédents, le Gandiolais est caractérisé par une salinité excessive de sa nappe phréatique associée à une faible salinité dans les sols irrigués. La conductivité électrique est élevée à partir du moment où l'eau commence à prendre un caractère salé lorsqu'elle dépasse 750 $\mu\text{s}/\text{cm}$. Les valeurs de salinité extrêmes correspondant à Ndiébène Gandiol, à Mboumbaye, à Mouit et à Dégou (situés à moins de 500 m de la mer), sur des puits abandonnés qui continuent de s'enrichir en sels. Les eaux littorales contiennent entre 4,35 à 15,39 g/l³. Ainsi, en saison sèche, la concentration saline est estimée dans différents villages (tableau 1).

Tableau 1. Concentration saline dans divers sites du Gandiolais

N°	Sites mesurés	Concentration saline
01	Ndoye Diagne	0,83 g/l
02	Rimbakh	9,33 g/l
03	Gantour	2,07 g/l
04	Gadga Lahrar	-7,62 g/l
05	Gouye Reine	4,35 g/l
06	Gniling Mbao	6,27 g/l
07	Toug Peulh	11,17 g/l
08	Mboumbaye	12,98 g/l
09	Dégou Niaye ;	12,70 g/l
10	Mouit	13,69 g/l
11	Ndiébène Gandiol	15,39 g/l
12	Ndoye Diagne	0,83 g/l

En fin de période pluvieuse, ces mêmes sites enregistrent respectivement 5,44g/l à Bountou Ndour; 0,25g/l à Ndoye Diagne; 4g/l à Rimbakh Gandiol; 0,25g/l à Gantour; 2,86 g/l à Gadga Lahrar; 1,01 g/l à Gouye Reine; 3,05g/l à Gniling Mbao; 6,7g/l à Toug Peulh; 10,81 g/l à Mboumbaye ; 9,91g/l à Mouit et 1,53 à Rao Peulh (figure 4).

³ Une eau de bonne qualité, destinée au maraîchage, doit avoir une concentration en chlorures évaluée à moins de 600 mg/l. L'eau d'irrigation de bonne qualité contient en principe 200 à 500 mg kg⁻¹ de sel soluble ce qui rejoint globalement les dispositions minéralogiques proposées par la FAO.

Du point de vue hydrochimique, les faciès chimiques de l'eau sont marqués par l'intrusion marine. Les villages de Rimbakh, de Ricotte, de Toug Peul (zone de transition), de Rao, de Gantour, de Ndoye Dia, de Ndoye Diagne (secteur continental) sont déterminés à 70 % par un faciès chimique chloruré à sulfaté calcique et magnésien. Tandis que Gouye Reine (zone de transition), Mouit, Mboumbaye (secteur plus proche de l'océan Atlantique) et Gandon indiquent un faciès chimique à 40 % chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique dans les secteurs de fortes concentrations caractérisant des points bas (secteurs déprimés). Cependant, Mboumbaye tend, tout de même, vers un faciès hyperchloruré sodique au même titre que Mouit et Dégou Niaye.

En revanche, les valeurs observées ne mettent pas en évidence une forte salinité dans le sol. Certains sites enregistrent des CE qui montrent, toutefois, une salinisation modérée à forte dans le profil du sol. Respectivement, les valeurs varient de 700 us/cm (0-15) à 205 us/cm (15-30) à Gadga Lahrar; 277 us/cm (0-15) à 220 us/cm (15-30) à Bountou Ndour; 99,4 us/cm (0-15) à 62 us/cm (15-30) à Keur Dièye; 664 us/cm (0-15) à 99,5 us/cm à Ndiébène Gandiol; 73,3 us/cm (0-15) à 42,9 us/cm (15-30) à Gantour; 152,7 us/cm (0-15) à 948 us/cm (15-30) à Ngaiïna; 27,6 us/cm (0-15) à 22,8 us/cm (15-30); 53,5 us/cm (0-15) à 66,7 us/cm (15-30) à Ricotte et 57,4 us/cm (0-15) à 52,4 us/cm (15-30) à Rimbakh Gandiol.

Les horizons superficiels (0-15 cm) sont plus concentrés que les horizons inférieurs (15-30) à l'exception de Ngaiïna et de Ricotte où les horizons inférieurs restent plus concentrés. Mais globalement aucune valeur n'atteint 1 m/s traduisant, de fait, une salinité faible dans le sol (figure 5).

En effet, les sols des cuvettes irrigués présentent des faciès très différents des eaux d'irrigation. La morphologie et les propriétés dynamiques sont marquées par l'abondance d'ions bivalents (Ca^+ et Mg^+) sous forme de carbonates. Le calcium est estimé respectivement 2,89 méq/100 à Gadga Lahrar; 2,8 méq/100 à Bountou Ndour; 1,98 méq/100 à Keur Dièye; 1,2 méq/100 à Ndiébène; 2,68 méq/100 à Ngaiïna; 1,72 méq/100 g à Ricotte; 4 méq/100 à Rimbakh; 1,50 méq/100 g à Gantour; 1,37 méq/100 g à Ndeugnette et 3 méq/100 g à Gouye Reine.

Par contre, les estimations du magnésium sont respectivement de l'ordre de 1,93 méq/100 g à Gadga Lahrar, 1,52 méq/100 g à Bountou Ndour, 1,31 méq/100 g à Ndiébène Gandiol; 0,63 méq/100 g à Gantour; 0,67 méq/100 g à Ndoye Diagne; 1,11 méq/100 g à Rimbakh

Gandiol; 1,45 méq/100 g à Gouye Reine; 0,78 méq/100 g à Ndeugnette; 1,36 méq/100 g à Pelour; 0,50 méq/100 g à Keur Dièye et 0,36 méq/100 g à Ricotte.

Figure 4: Salinité de l'eau de la nappe

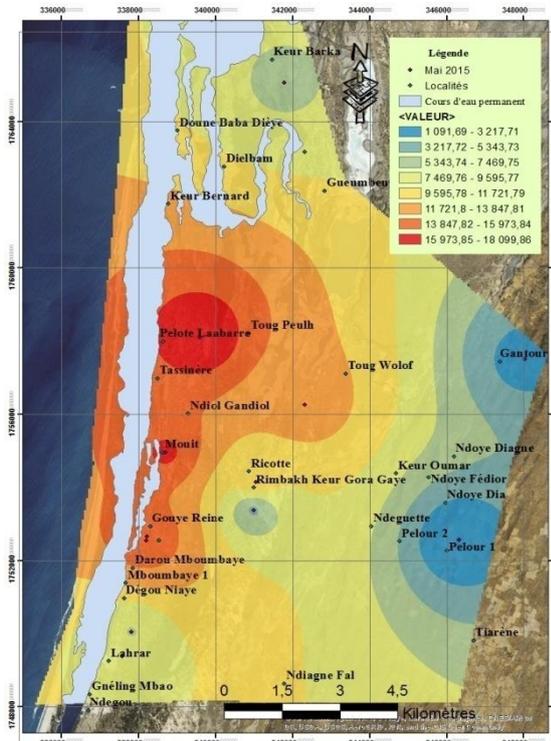
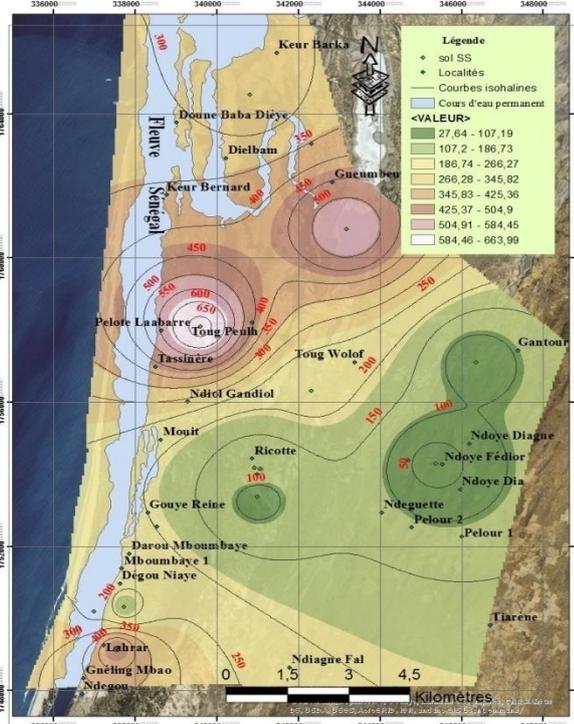


Figure 5: Salinité des sols irrigués



Les valeurs de Na^+ restent comprises entre 0,116 et 0,676 meq/100g en saison sèche contre 0,001 et 0,047 meq/100g en fin de saison des pluies. Même si les valeurs de sodium sont globalement faibles dans l'ensemble des cuvettes (littorales et continentales), il est noté une hausse de sa teneur en saison sèche avec respectivement Gadga Lahrar (0,324 meq/100g), Bountou Ndour (0,676 meq/100g), Keur Dièye (0,202 meq/100g), Ndiébène Gandiol (0,213 meq/100g), Gantour (0,214 meq/100g), Ngaina (0,246 meq/100g), Ndoye Diagne (0,116 meq/100g), Ricotte (0,127 meq/100g) et Rimbakh (0,181 meq/100g).

Or, en fin de saison de saison des pluies, le lessivage permet de réduire sensiblement ces valeurs avec Gadga (0,016 meq/100g), Bountou Ndour (0,047 meq/100g), Ndiébène (0,001 meq/100g), Gantour (0,001 meq/100g), Ndoye Diagne (0,019 meq/100g), Rimbakh (0,034 meq/100g), Gouye Reine (0,012 meq/100g), Ndeugnette (0,003 meq/100g) et Pelour (0,017 meq/100g).

Au regard de ces observations, la sodicité de l'eau d'irrigation ne pose vraisemblablement pas de problème pour ces cuvettes exploitées. De même que les pourcentages respectifs de sodium échangeable (PSE) sont très faibles (moins de 1 %) et permettent de justifier la faible

concentration de sodium dans le sol des *niayes*. Le PSE est de 0,20 % à Gadga Lahrar; 0,48 % à Ndiébène Gandiol; 0,07 % à Pelour; 0,4 % à Rimbakh Gandiol; 0,01 % à Gantour; 0,02 % à Ndeugnette; 0,92 % à Bountou Ndour; 0,10 à Ndoye Diagne et 0,12 à Gouye Reine. Dans ce cadre, l'ESP est évalué par rapport au cation de référence (Na sur la base de la somme des cations échangeables).

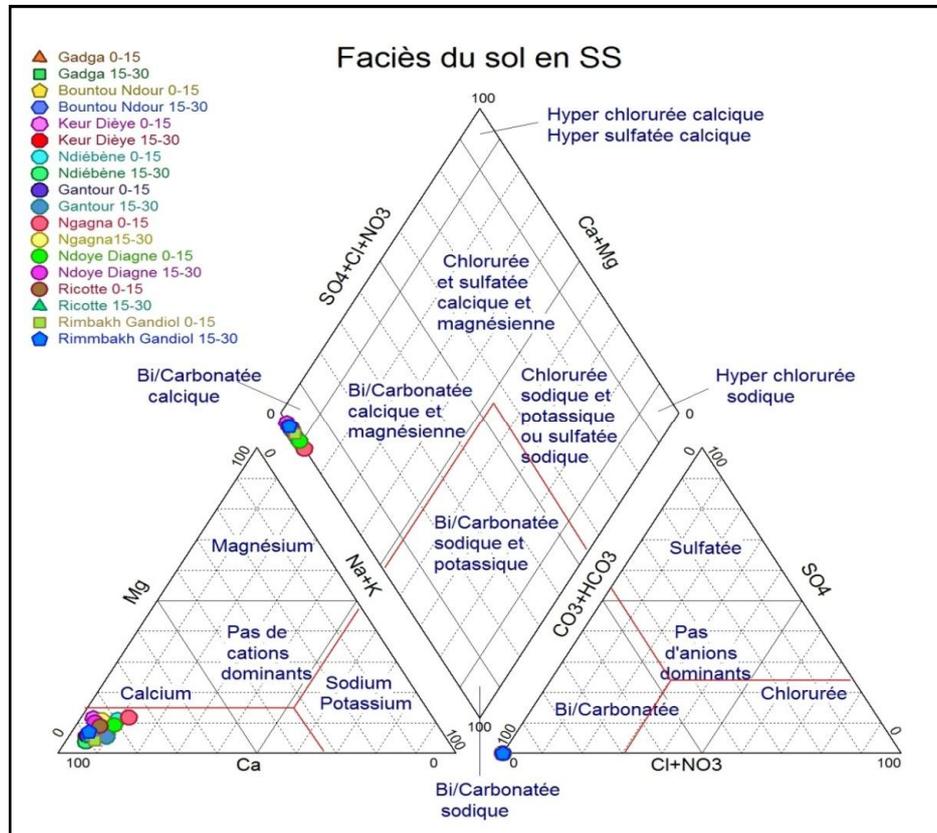
D'un autre côté, le calcul des rapports entre les cations dominants sont également caractérisés par une concentration des ions bivalents alors que les rapports Na/K ne dépassent pas 0,6 méq/100g en saison sèche et 0,320 méq/100g de sol dans tous les horizons.

En saison sèche, les valeurs des différents horizons du rapport Ca+Mg (0-15 et 15-30) sont estimées à 6,243 et 6,046 méq/100g à Gadga Lahrar; 5,406 et 5,653 méq/100g à Bountou Ndour; 4,833 et 8,016 méq/100g à Ndiébène Gandiol; 5,223 et 5,483 méq/100 g à Gantour; 4 et 4,816 méq/100g à Ndoye Diagne; 4,054 et 4,764 méq/100 g à Rimbakh; 4,883 et 4,778 méq/100 g à Ricotte; 5,335 et 6,392 méq/100 g à Keur Dièye; 3,649 et 4,48 méq/100g à Ngaiïna.

Ce rapport ionique connaît une diminution en saison des pluies due aux variations des ions bivalents Ca^{+} et Mg^{+} dans le profil du sol en fin de saison de lessivage. Respectivement, on note 5,1 et 4,575 méq/100 g à Gadga; 3,85 et 4,225 méq/100g à Bountou Ndour; 3,176 et 3,425 méq/100 g à Ndiébène Gandiol; 1,95 et 1,75 méq/100 g à Gantour; 2,425 et 2,075 méq/100 g à Ndoye Diagne; 4,054 et 4,764 méq/100g à Rimbakh Gandiol; 3,525 et 4,825 méq/100 g à Gouye Reine; 3 et 2,025 méq/100 g à Ndeugnette; 4,35 et 6,375 méq/100g à Pelour. Les différences entre saison du rapport Ca+Mg sont de l'ordre de -1,89 à 4,59méq/100g.

Globalement, le profil du sol est essentiellement calcique et magnésien dans tous les villages, ce qui semble logique puisque le Gandiolais est un milieu carbonaté (figure 6).

Figure 6: Caractérisation géochimique des cuvettes agricoles du Gandiolais



Le diagramme de PIPER présente un faciès simple, caractérisant la dominance des traceurs bivalents (Ca^+ et Mg^+) et la faiblesse des ions retenus dans le complexe sableux. Notons que les ions faiblement hydratés, autrement le Mg^+ et surtout le Ca^+ sont mieux fixés que les ions monovalents et forment des flocculants plus énergétiques que les cations à fort taux d'hydratation que constituent K^+ et Na^+ . Il existe peu ou pas de différence cationique entre les deux saisons même si globalement il y a une hausse sensible de la teneur des ions en saison sèche et en surface mais qui ne permet guère de modifier le faciès d'ensemble.

3. Discussions

Les dynamiques actuelles dans les différents écosystèmes montrent une forte présence de la contrainte saline mais dont les causes sont très diversifiées. Les mêmes résultats montrent une grande variabilité de la salinité entre les sols et entre les horizons d'un même profil confirment que la quantité de sels retenus par un sol donné dépend de sa texture (RICHARDS, 1954;

ELGABALY, 1972; BOULAINÉ, 1979; LOYER, et al. 1982). Ces faits semblent montrer que dans ces milieux, la variation et le niveau de la salinité seraient essentiellement dues à l'influence de la saison, à la topographie et à l'hydrologie. La texture n'interviendrait qu'au niveau du profil pour différencier les sols ou les horizons.

La cartographie des sols du Lampsar rive droite (Biffèche, de Ndiougue, de Mbodiène et de Ngaw) présente une salinisation primaire facile à gérer avec une bonne association irrigation/drainage. Cette gestion de l'eau est facilitée par la SAED dans sa mission d'aménagement hydro-agricole où l'entrée et la sortie de l'eau sont permanentes. En effet, KA (2000) a montré que le risque de salinisation est moins grave dans les aménagements gérés par la SAED. Selon KANE (1997), grâce à un suivi des sols salés dans les périmètres de Boundoum et de la Grande Digue Tellel, l'irrigation et le drainage permettent de faire baisser considérablement le degré de salinité.

Cependant, dans les aménagements privés non adéquats, le mauvais système de drainage favorise une plus grande recharge de la nappe par infiltration de l'eau d'irrigation et par conséquent un risque plus élevé de dégradation. Cette forme de salinité secondaire dite sodisation prend surface dans le Delta du Fleuve Sénégal. La récupération de ces sols est coûteuse, voire impossible.

En revanche dans le Gandiolais qui offre une salinité différente par rapport aux deux premiers milieux, on peut admettre dans l'ensemble que les eaux du domaine littoral ont une concentration assez élevée en sels et l'utilisation de ces eaux pour l'irrigation dans cette zone pourrait engendrer éventuellement des problèmes de salinisation des sols surtout en saison sèche qui reste la période des fortes productions habituelles. Certes, il y a une baisse par rapport à la saison sèche mais les valeurs dans la partie littorale sont toutes révélatrices d'une eau fortement minéralisée. Ces eaux du secteur littoral contiennent un pourcentage important de Na^+ et Cl^- mais toutefois il faut tenir compte de la nature de l'encaissant essentiellement sableux (plus de 95% de sables moyens à fins). Les sols gandiolois offrent un pouvoir matriciel très grand, ce qui fait transiter les sels libres en profondeur pendant la période pluvieuse. La ré-infiltration des sels solubles accentue ainsi cette vulnérabilité de la nappe quaternaire.

La confrontation des mesures actuelles et celles de DIALLO M. (2006) et JACOUTOT A. (2006) permettent de valider l'hypothèse d'une accentuation de la salinité de l'eau

d'irrigation causée par l'évolution de la brèche. La minéralisation rapide de la nappe des sables quaternaires dans le secteur du Gandiolais est donc à corrélérer avec l'agrandissement de la passe de l'actuelle embouchure qui favorise des échanges rapides entre les eaux marines et les eaux douces.

Conclusion

En définitive, le delta, le bassin arachidier comme le bas estuaire du fleuve Sénégal sont affectées par des salinités souvent extrêmes qui compromettent le développement cultural. Si dans le Haut Saloum, les terres agricoles se transforment en terres de saliculture dont les productions sont très importantes et participent fortement à l'amélioration des revenus, en revanche le Gandiolais et les terres du delta constituent des pôles d'excellence pour la riziculture et le maraichage au plan national.

La gestion de la salinité doit fondamentalement reposer sur une connaissance des types de salinité mais également sur les interrelations entre le complexe argilo-humiques et les eaux en contact avec le sol. Cette prise en charge de la salinité dans l'ensemble du delta du fleuve Sénégal incluant le Gandiolais est également basé sur la maîtrise des ouvrages et de leurs incidences sur l'accentuation de la salinité. Dans le delta, le drainage semble apparaitre alors comme la solution idéale (FAO, 1996) même s'il reste confronté à des difficultés liées à la pente quasi nulle dans le delta du fleuve. Toutefois, cette méthode n'est pas jugée efficace sur les sols sodiques qui ont déjà perdu leur structure et leur teneur en matière organique d'où l'application des méthodes d'amendement organique (fumier, compost) et minérale (phosphogypse) pour récupérer les sols salés et améliorer leur complexe argilo-humique.

Dans le Gandiolais, la gestion de la salinité repose particulièrement sur le retour d'une eau douce. Compte tenu du pouvoir matriciel important, les parcelles maraichères peuvent être récupérées par lessivage. Cette technique repose sur l'exigence d'abandonner les eaux de la nappe quaternaire déjà affectée par l'intrusion marine actuelle.

Références bibliographiques

ARAR A., 1972. «L'irrigation et le drainage dans leurs rapports avec la salinité et la saturation des sols par l'eau». In FAO: la salinité, Bull, frigo et Drainage, n° 1, pp. 98-125.

BARBIERO, L., et LAPERROUSAZ, C., 1999, Cartographie, de la salinité dans la vallée du Sénégal. Succès d'une démarche ascendante: Géophysique des sols et des formations Superficielles.

BOIVIN P. et Le BRUSQ J. Y., 1985 : Désertification et salinisation des terres au Sénégal, Problèmes et remèdes, 6 p.

BRESLER E., DAGAN G., 1982. «Modeling of water and solute transport inunsaturated heterogeneous fields». ProcSymp unsaturated flow and transport modelling.US Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CP-0030, PNI-SA-10325, Seattle, Washington pp.159-178.

CHAPMAN D., KIMSTACH V., 1966. «Selection of water quality variables, in Chapman D (Ed.). Water quality assessments: a Guide to the Use of biota, sediments and water in Environment monitoring», 2nd ed. E et FN Spon, London, pp.59-125.

DIALLO Maimouna, 2006, Aménagements hydrauliques et mutations du Bas- estuaire du fleuve Sénégal: Impacts sur la nappe des sables dunaires du Gandiolais, mémoire de DEA Chaire UNESCO, UCAD, 79p.

DIALLO MariamaDalanda et al, 2015. «Etude comparative de la salinité de l'eau et des sols dans la zone Nord des Niayes (Sénégal)», *AfricanCrop Science Journal*, Vol. 23, numéro 2, pp: 101-111.

ELGABALY M.M., 1972. «Problèmes d'échantillonnage, d'analyse et de cartographie des sols salins». In: FAO: la Salinité. Séminaire de Bagdad, Bull. Irrig. Drain. N°. 7, pp. 33-44.

FAO., 1978. Directives de la description des sols. FAO/Rome, 72 p.

FAO, 1996 Drainage des terres irriguées. Gestion des eaux en irrigation, manuel de formation n°9, Rome, 74p.

FAYE C. A. T., 2011. Dégradation des terres agricoles et recomposition socio-spatiale en milieu aride. Étude du cas du village de Palado dans la communauté rurale de Mbadakhoune, région de Kaolack. Mémoire de Master II de Géographie, U.G.B. Saint-Louis, 209 p.

- GNING A. 2015. Etude et Modélisation hydrogéologique des interactions Eaux et Surface-Eaux Souterraines dans un contexte d'agriculture irrigués du Delta du Fleuve Sénégal, Thèse de Doctorat de troisième cycle, Université de Liège et de Cheikh Anta Diop de Dakar, 259p.
- JACOUTOT A., 2006. *Modifications environnementales et ses conséquences : cas du Gandiolais et Parc National de Diawling*, stage de recherche, IGA, 174 p.
- KAO.H., 2000. Géomatique appliquée à l'étude des eaux souterraines dans la vallée du Fleuve Sénégal, Master. B.sc. Génie géologique Université du Québec INRS –Eau 138P
- KANE Alioune, 1997. *L'après barrage dans la vallée du fleuve Sénégal: Modification hydrologiques, morphologique, géochimique et sédimentologiques. Conséquences sur le milieu naturel et les aménagements hydrologiques*, Thèse de doctorat d'Etat de Géographie physique, UCAD, 551p.
- LOYER J.Y. et Le Brusq J.Y., 1982. « Relations entre les mesures de conductivité sur des extraits de sols de rapports sol/solution variables dans la vallée du fleuve Sénégal ». Cah. ORSTOM, série Pédo. Vol. XIX, n° 3. 9p.
- LOYER JeanYves, 1989. *Les sols salés de la basse vallée du fleuve Sénégal : caractérisation, distribution et évolution sous cultures*, thèse de Doctorat, ORSTOM, 137p.
- LOYER Jean Yves, 1991. « *Dégradation saline des sols, induite par l'irrigation en domaine sahélien* », ORSTOM, 9p.
- LTIFI W., 2008. *Bilan d'eau et des sels dans les périmètres irriguées KALAAT L'ANDALOUS*, laboratoire du centre de gestion du ressource en eau (CGRE) de l'INAT, mémoire de mastère. 120p.
- NDIAYE R., 2009. *Geographic information science: contribution to understanding Salt and sodium affected soils in the Senegal river valley*, Kansas State University, 159p.
- RAHEJA P.C., 1966. « Aridity and salinity (A survey of soils and land use) ». In. H. Boyko (ed.) *Salinity and Aridity, New Approaches to old Problems*. Dr. Junk publishers, Netherlands p. 43-127.
- RICHARD et al (sous la dir.), 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*, USSL, Handbook N, U.S Gov, Washington DC, 653 p.
- SADIOSiaka, 1991. *Pédogenèses et potentialités forestières des sols sulfatés acides salés des tannes du Sine Saloum, Sénégal* ORSTOM, Bondy, 269p.
- THIAM M.D., 1986. *Géomorphologie, Évolution et sédimentologie des terrains salés du Sine Saloum (Sénégal)*. Thèse de 3e cycle, Univ. Paris 1, 186 p.