

Etude comparative d'un lessivage de sols salés sulfatés acides en milieux contrôlés

Adolphe Diatta^{1,2}, Moustapha Diene⁴, Didier Maria Dione², Issa Leye², Moussé Landing Sane², Daouda Badiane¹,
Baba Sarr³, Soussou Sambou², Saïdou Moustapha Sall¹

1 Université Cheikh Anta Diop de Dakar – UCAD, Ecole Supérieure Polytechnique – ESP, Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de l'Océan Siméon Fongang – LPAO / SF, Sénégal

2 Université Cheikh Anta Diop de Dakar – UCAD, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Physique, Laboratoire d'Hydraulique et Mécanique des Fluides – LHMF, Sénégal

3 Université Cheikh Anta Diop de Dakar - UCAD, Institut Fondamental de l'Afrique Noire – IFAN, Laboratoire de Géologie, Sénégal

4 Université Cheikh Anta Diop de Dakar – UCAD, Faculté des Sciences et Techniques, Département de Géologie, Laboratoire d'Hydrogéologie, Sénégal

Résumé

Dans le cadre de la lutte contre la salinisation et l'acidification des basses terres côtières Sénégalaises, plusieurs méthodes sont mises en œuvre parmi lesquelles la construction de barrages et digues anti-sels utilisant des techniques modernes, traditionnelles diolas ou mixtes. Cependant, peu de travaux s'intéressent à leur efficacité réelle dans les processus de récupération des sols contaminés. L'objectif de ce papier est de présenter une étude comparative de l'efficacité des ouvrages modernes et traditionnels diolas dans les processus de lessivage des sols salés sulfatés acides sénégalais en milieu contrôlé. Ainsi, un dispositif expérimental a été construit à l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar. Il est constitué de trois bacs. Le premier est un bac témoin, tandis que le second et le troisième simulent respectivement le fonctionnement des ouvrages traditionnels diolas et modernes. Ces bacs sont remplis d'échantillons de sols issus des « tannes » vifs de Fayil (département de Fatick). L'expérience consiste à lessiver les échantillons de sols des bacs 2 et 3 par vidanges et renouvellements jusqu'à ce que la conductivité électrique à 50 cm de profondeur soit inférieure à 4 mS/cm dans un bac. Après quatre vidanges et renouvellements, la conductivité électrique est passée de 15,27 mS/cm à 4.04 mS/cm et de 17.30 mS/cm à 11,17 mS/cm dans les Bac 2 et 3 respectivement. Il résulte de ces résultats que les ouvrages traditionnels diolas sont plus performants que ceux modernes dans les processus de récupération des sols salés sulfatés acides du pays.

Mots-clés : barrages anti-sel, salinisation, acidification, bas-fonds, récupération

Comparative study of leaching acid sulfate salty soils in controlled environments

Abstract:

In the framework of the resilience to the Senegalese's coastal lowlands salinization and acidification, several methods are implemented including the construction of anti-salt dams and dykes using modern, traditional diola or mixed techniques. However, few works have been carried out on their real effectiveness in the contaminated soils' recovery process. This paper's objective is to present a comparative study on the effectiveness of modern and diola traditional works in the process of leaching the country's acid sulphate salty soils in a controlled environment. Thus, an experimental device was built at Cheikh Anta Diop University of Dakar. It is consisted of three tanks. The first one is a control tank, while the second and the third simulate respectively the functioning of the traditional Diola and the modern works. These tanks are filled with soil samples taken from the acid sulphate salty soils of Fayil (Fatick's department). The experience consists to leach the soil samples of tanks 2 and 3 by emptying and renewals water until the electrical conductivity becomes lower than 4 mS/cm at 50 cm depth in one tank. The results obtained after four emptying and renewals show that the electrical conductivity passed from 15,27 mS/cm to 4.04 mS/cm and 17.30 mS/cm to 11,17 mS/cm in tank 2 and 3 respectively. It follows from these results that traditional Diola structures are more efficient than modern ones in the process of recovery the country's acid sulphate salty soils..

Key Words: anti-salt dams, salinization, acidification, lowlands, recovery

¹ Corresponding author: dadh69@yahoo.fr

INTRODUCTION

Avec 9 404 475 Ha de terres disponibles pour l'agriculture ([1]), le Sénégal a 1 700 000 Ha de terres salées dont 660 000 Ha de sols salés sulfatés acides ([2]). De vastes étendues de basses terres stériles nues « tannes vifs » ou colonisées par des herbes halophiles jalonnent ses 700 km de côtes atlantiques. Leurs origines seraient antérieures à 1500 ans BP et leur extension correspondrait à un climat tropical devenant plus sec ([3]). Ce processus se poursuit de nos jours et est de surcroît favorisé par les activités anthropiques ([3]), mais aussi les sécheresses des années 1910, 1970 et 1980, les irrégularités pluviométriques des années 1990 et les changements climatiques en cours. Ces bas-fonds jadis exploités par les paysans pour cultiver du riz sont de plus en plus abandonnés au profit des plateaux, entraînant leur déforestation, l'appauvrissement de leurs sols, leur érosion hydrique et le comblement des lits mineurs des cours d'eau. Afin de lutter contre cette contrainte naturelle au développement agricole d'une importante partie du pays, plusieurs techniques allant des méthodes mécaniques (barrages et digues anti-sel) ([3],[4], [5], [6], [7], [8], [9]), chimiques ([10], [11]), agronomiques ([11]), biologiques ([11],[12],[14]) et biomécaniques ([11], [13], [15]), mais aussi la synthèse et la sélection dans les laboratoires nationaux (ISRA), sous – régionaux et internationaux d'espèces végétales tolérantes à la salinité et à l'acidité des sols ([16], [17]) sont mises en œuvre. Ainsi, depuis la période coloniale, d'importants programmes de construction de barrages et digues anti-sel modernes sont exécutés dans différentes vallées du Sine – Saloum et de la Casamance naturelle pour lutter contre leur salinisation ([6],[7],[18], [19], [20], [21]). Ils sont généralement constitués d'une digue en remblai d'apport et d'un ouvrage en béton (déversoir) pour évacuer les eaux excédentaires. Ce déversoir est généralement équipé de batardeaux ou de vannes murales à déplacement vertical pour la régulation et la vidange de la retenue. Leur principe de lessivage des sols contaminés consiste à accumuler en amont de la digue de l'eau douce de pluie (moins riche en ions) pour permettre la diffusion des solutés mobiles de la solution du sol ([23]) et de la nappe phréatique sous-jacente ([2]) et les évacuer par vidanges de la retenue. A côté de ces ouvrages modernes, les paysans diolas construisent des barrages et digues anti-sel traditionnels depuis des siècles ([22]). Ces ouvrages sont constitués d'une digue en remblai de terre prélevé localement. Ils ne sont pas équipés de déversoir seuil, mais de drains de troncs de rôniers ou de palmiers perforés pour la régulation et la vidange de la retenue. Leur principe de fonctionnement est identique à celui des ouvrages modernes. Cependant, la tranchée d'emprunt du remblai de la digue joue aussi le rôle de collecteur des eaux souterraines et permet de drainer pendant les vidanges de la retenue les ions métalliques lourds très souvent chélatés et victimes des barrières anti-osmotiques. Peu d'études s'intéressent à l'efficacité de ces ouvrages anti-sel dans les processus de récupération des sols salés sulfatés acides du pays.

L'objet du présent papier est de déterminer les performances des barrages et digues anti-sel modernes et traditionnels diolas dans les processus de récupération des sols salés sulfatés acides des zones arides, semi-arides et subhumides sèches du Sénégal.

OUTILS ET METHODOLOGIE

Outils

Un dispositif expérimental polyvalent en maçonnerie (Figures 1 et 2) a été construit au laboratoire d'Hydraulique et de Mécanique des Fluides de la Faculté des Sciences et Techniques de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar. Il est un ouvrage de génie civil de dimensions extérieures 5,40 m x 2,50 m x 1,10 m divisé en trois grands bacs de dimensions intérieures 2,06 m x 1,20 m x 0,96 m et trois autres plus petits de dimensions intérieures 0,54 m x 0,50 m x 0,70 m. Les surfaces intérieures ont été rendues étanches avant d'être carrelées.

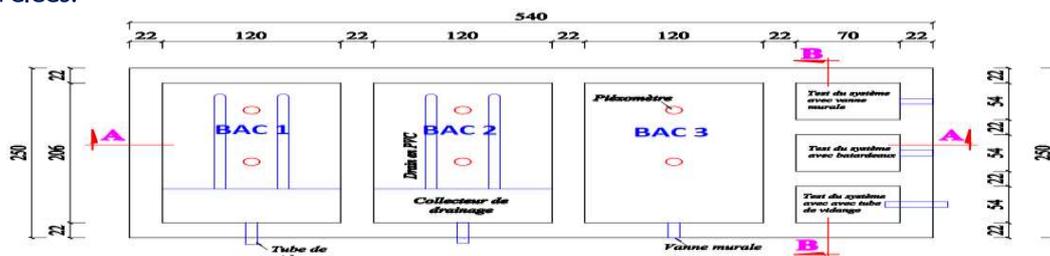


Fig. 1 : Vue de dessus du dispositif expérimental

Les présentes investigations ont été réalisées avec les trois grands bacs (Figures 1 et 2). Ceux-ci sont tous équipés de deux piézomètres en PVC DE125, ASS dont les crépines sont respectivement positionnées entre 20 - 30 cm et 45 – 55 cm pour faciliter le prélèvement d'échantillons d'eau profonde et suivre le niveau de l'eau dans les bacs.

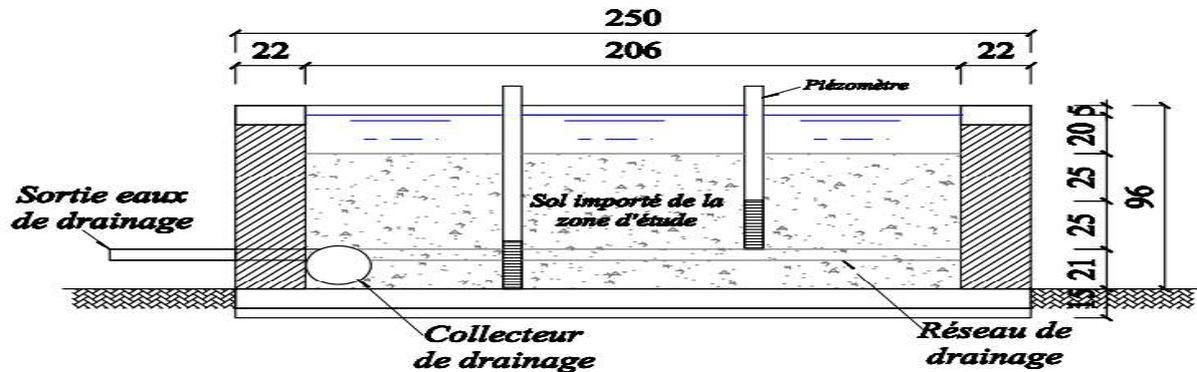


Fig. 2 : Illustration des piézomètres du dispositif expérimental

En sus, les Bacs 1 et 2 sont équipés chacun d'un réseau de drainage et d'un orifice long en PVC DE25, PN6 pour l'évacuation des eaux de lessivage. Le réseau de drainage est constitué de deux drains en PVC DE63, ASS et d'un collecteur en PVC DE110, ASS. Il est posé à 21 cm du fond des bacs. En outre le Bac 3 est équipé d'une vanne murale pour l'évacuation des eaux de lessivage. Les trois bacs sont alimentés par le réseau de distribution d'eau potable de la ville de Dakar, via une conduite en PEHD DE25, PN6. Les Bacs 2 et 3 simulent respectivement le fonctionnement des barrages et digues anti-sel traditionnels diolas et modernes ; tandis que le Bac N1 est un bac témoin.

Outre le dispositif expérimental, le matériel utilisé pour mener l'expérience est aussi composé d'un pH-mètre électronique de marque Littro PH-206, d'un conductivimètre électronique de marque HACH CO150, de deux pots d'échantillonnage, de deux béciers de 500 ml et d'un dispositif de prélèvement d'échantillons d'eau dans les piézomètres constitué d'un pot et d'une corde.

Mode opératoire

L'expérience consistait à prélever des échantillons de sols dans la partie aval du barrage anti-sel N°3 de Fayil (département de Fatick, commune de Diouroup – Coordonnées géographiques : 14°18'24"N et 16°27'56"O) (Figures 3 et 4) et de les transférer à l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar, pour remplir les trois bacs expérimentaux jusqu'à 25 cm de la surface libre supérieure des murs. Après cette opération, il est procédé à la mise en eau des bacs jusqu'à ce que la hauteur de la lame d'eau au-dessus de l'échantillon de sol soit égale à 20 cm.



Fig. 3 : Illustration de la zone de prélèvement des échantillons de sols

Ensuite, dans un premier temps, l'eau des Bacs 2 et 3 est vidée en moyenne tous les quatre à cinq jours et renouvelée le lendemain pour permettre la pénétration de l'oxygène atmosphérique dans la solution de sol et l'oxydation de la pyrite ; tandis que l'eau du Bac 1 ne fait pas l'objet de vidange. Des apports d'eau y sont toujours effectués pour compenser les pertes par évaporation et évapotranspiration. Après chaque renouvellement d'eau, la conductivité électrique, le pH et la température de l'eau de surface et des

piézomètres est mesurée quotidiennement toutes les heures de 08h30 à 17h30 sans dilution afin de réduire l'influence des paramètres de l'eau de robinet. Les mesures sont répétées trois fois avant de passer au bac suivant. Dès que la conductivité électrique à une profondeur de 50 cm est inférieure à 4 mS/cm dans un des bacs, les vidanges, renouvellements et compensations d'eau sont suspendus et la périodicité de mesure des paramètres est en moyenne d'une semaine.

RESULTATS OBTENUS

Lors de la première mise en eau du dispositif expérimental le 25 avril 2019, un incident s'était produit. Des fuites d'eau ont été notées au niveau des raccordements des orifices longs de drainage des Bacs 1 et 2. Il a fallu procéder à une vidange d'urgence des deux bacs, à leur réparation et leur remise en eau le 01 mai 2019. En sus, lors de la remise en eau des deux bacs, les pertes d'eau (évaporation & évapotranspiration) dans le Bac 3 ont été compensées.

Profils de la conductivité électrique et du pH les 02 et 29 mai et 08 et 15 juin 2019

Les résultats des profils de la conductivité électrique et du pH les 02 et 29 mai et 08 et 15 juin 2019 au début sont résumés dans le tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 : Récapitulatif des profils de la conductivité électrique et du pH des 02 et 29 mai et 08 et 15 juin 2019

Date	Prof. (cm)	pH			CE (mS/cm)			Température (°C)		
		Bac 1	Bac 2	Bac 3	Bac 1	Bac 2	Bac 3	Bac 1	Bac 2	Bac 3
02/05/2019	00	9,04	8,90	8,63	1,02	1,01	5,46	28,2	28,8	28,5
02/05/2019	25	9,05	8,29	8,56	6,08	6,36	10,49	26,5	27,1	26,9
02/05/2019	50	8,28	7,74	8,74	13,79	15,27	17,30	26,7	27,5	26,9
29/05/2019	00	6,26	6,25	6,24	1,38	0,81	0,78	32,7	31,1	31,5
29/05/2019	25	6,10	6,14	6,10	3,67	1,01	2,40	30,7	30,0	30,1
29/05/2019	50	6,04	6,04	5,91	7,20	3,63	11,27	30,1	29,2	29,6
08/06/2019	00	6,24	6,20	6,20	1,66	0,89	0,95	31,6	29,2	29,7
08/06/2019	25	6,07	6,08	6,00	4,24	1,62	6,02	28,6	28,0	28,3
08/06/2019	50	6,06	6,08	5,94	7,12	4,17	11,17	27,5	27,8	28,2
15/06/2019	00	6,31	6,32	6,32	3,65	1,42	1,60	32,27	31,4	32,3
15/06/2019	25	6,21	6,23	6,10	4,24	1,62	6,02	30,8	30,3	30,1
15/06/2019	50	6,15	6,14	5,98	6,28	4,49	11,07	29,50	28,8	29,2

Résultats du lessivage des échantillons de sols à 00 cm

Les valeurs moyennes journalières du pH, de la conductivité électrique et de la température mesurés dans les Bacs 1, 2 et 3 à 00 cm de profondeur sont résumés dans le tableau 2.

Tableau 2 : Récapitulatif des résultats de lessivage des échantillons de sols à la profondeur z = 00 cm

Date	Prof. (cm)	pH			CE (mS/cm)			Température (°C)		
		Bac 1	Bac 2	Bac 3	Bac 1	Bac 2	Bac 3	Bac 1	Bac 2	Bac 3
02/05/2019	00	9,04	8,90	8,63	1,02	1,01	5,46	28,2	28,8	28,5
03/05/2019	00	8,15	8,24	8,05	0,88	1,36	6,43	29,6	29,4	29,5
04/05/2019	00	6,90	6,86	6,80	1,71	2,48	6,41	30,3	28,6	28,7
05/05/2019	00	6,84	6,83	6,89	0,96	1,20	4,86	29,5	29,9	29,7
06/05/2019	00	6,94	7,07	7,17	1,40	1,30	4,34	31,1	31,7	32,2
07/05/2019	00									
08/05/2019	00									
09/05/2019	00	7,40	7,62	7,47	2,75	0,57	0,66	33,2	34,0	34,4
10/05/2019	00	7,66	7,82	7,59	1,63	0,51	0,73	32,8	32,0	33,4
11/05/2019	00	7,62	7,94	7,64	2,01	0,51	0,73	32,8	31,9	32,4
12/05/2019	00	7,53	7,86	7,57	2,64	0,61	0,87	31,6	31,4	31,9
13/05/2019	00									
14/05/2019	00									
15/05/2019	00	7,02	7,23	7,08	3,64	0,50	0,55	32,7	31,1	30,1
16/05/2019	00	6,46	6,71	6,62	4,61	0,46	0,61	31,5	29,1	29,6
17/05/2019	00	6,50	6,68	6,59	2,68	0,52	0,66	31,9	30,5	30,4
18/05/2019	00	6,47	6,56	6,48	2,91	0,63	0,68	31,5	31,4	31,1
19/05/2019	00									
20/05/2019	00									
21/05/2019	00	7,53	7,51	7,49	0,64	0,59	0,66	32,2	31,3	31,0
22/05/2019	00	7,29	7,29	7,27	0,76	0,60	0,69	29,2	26,8	26,7
23/05/2019	00	6,50	6,50	6,46	0,90	0,63	0,74	31,1	30,9	29,9
24/05/2019	00	6,49	6,50	6,49	1,00	0,67	0,68	31,7	31,2	30,8
25/05/2019	00									
26/05/2019	00									
27/05/2019	00	6,23	6,22	6,23	1,14	0,69	0,80	30,2	29,9	29,8
28/05/2019	00	6,16	6,18	6,16	1,24	0,75	0,82	31,4	31,0	29,7
29/05/2019	00	6,26	6,25	6,24	1,38	0,81	0,78	32,7	31,1	31,5
08/06/2019	00	6,24	6,20	6,20	1,66	0,89	0,95	31,60	29,20	29,70
15/06/2019	00	6,31	6,32	6,32	3,65	1,42	1,60	32,27	31,4	32,3
Moyenne algébrique		6,98	7,06	6,97	1,87	0,85	1,85	31,32	30,57	30,60
Ecart type		0,1569	0,1614	0,1439	0,2346	0,1002	97,9689	0,2828	0,3231	0,3699
Variance		0,0246	0,0260	0,0207	0,0550	0,0100	9 597,9	0,0800	0,1044	0,1368
Moment centré d'ordre 3		0,0188	0,0137	0,0095	0,0576	0,0097	0,5571	(0,0722)	(0,0539)	0,0300

Résultats du lessivage des échantillons de sols à 50 cm

Les valeurs moyennes journalières du pH, de la conductivité électrique et de la température mesurés dans les Bacs 1, 2 et 3 à 50 cm de profondeur sont résumés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Récapitulatif des résultats de lessivage des échantillons de sols à la profondeur z = 50 cm

Date	Prof. (cm)	pH			CE (mS/cm)			Température (°C)		
		Bac 1	Bac 2	Bac 3	Bac 1	Bac 2	Bac 3	Bac 1	Bac 2	Bac 3
02/05/2019	50	8,28	7,74	8,74	13,79	15,27	17,30	26,7	27,5	26,9
03/05/2019	50	7,82	7,49	7,90	12,76	14,26	19,32	27,1	28,1	27,9
04/05/2019	50	5,86	6,42	6,58	12,67	13,45	20,84	26,8	27,3	25,5
05/05/2019	50	6,60	6,38	6,50	12,95	12,87	20,68	28,1	28,3	28,7
06/05/2019	50	6,70	6,26	6,37	12,91	12,46	20,18	29,2	30,2	29,7
07/05/2019	50									
08/05/2019	50									
09/05/2019	50	6,74	5,82	6,32	13,02	11,37	19,82	31,6	31,3	31,8
10/05/2019	50	6,78	5,86	6,30	12,90	11,31	18,98	29,8	30,1	30,3
11/05/2019	50	6,66	5,85	6,31	12,14	10,72	17,89	29,8	29,9	30,5
12/05/2019	50	6,75	6,20	6,36	11,39	9,62	16,86	29,0	29,1	29,6
13/05/2019	50									
14/05/2019	50									
15/05/2019	50	5,74	6,24	6,34	10,28	4,49	15,47	28,7	29,1	29,6
16/05/2019	50	5,27	6,15	6,15	9,75	4,69	14,89	27,5	28,3	28,7
17/05/2019	50	6,40	6,29	6,27	8,96	4,58	14,06	27,2	28,6	28,9
18/05/2019	50	6,22	6,13	6,13	8,90	4,52	13,84	26,9	28,7	27,8
19/05/2019	50									
20/05/2019	50									
21/05/2019	50	7,33	7,26	7,24	8,53	4,40	12,63	29,8	29,9	30,1
22/05/2019	50	7,13	7,07	7,04	5,53	4,20	12,36	27,4	25,9	26,3
23/05/2019	50	6,33	6,29	5,43	8,02	4,16	10,70	29,5	28,7	28,0
24/05/2019	50	6,30	6,26	6,22	7,68	4,04	12,00	29,4	29,1	29,2
25/05/2019	50									
26/05/2019	50									
27/05/2019	50	6,06	6,01	5,97	7,29	3,88	11,87	28,3	28,5	28,2
28/05/2019	50	6,00	5,96	5,91	7,29	3,68	11,53	29,0	29,2	28,1
29/05/2019	50	6,04	6,04	5,91	7,20	3,63	11,27	30,1	29,2	29,6
08/06/2019	50	6,06	6,08	5,94	7,12	4,17	11,17	27,5	27,8	28,2
15/06/2019	50	6,15	6,14	5,98	6,28	4,49	11,07	29,5	28,8	29,2
Moyenne algébrique		6,51	6,36	6,45	9,88	7,56	15,22	28,58	28,80	28,76
Ecart type		0,1439	0,1126	0,1512	0,5263	0,8816	0,7234	1,9003	1,9099	1,9166
Variance		0,0207	0,0127	0,0228	0,2770	0,7773	0,5234	3,6111	3,6478	3,6733
Moment centré d'ordre 3		0,0122	0,0099	0,0307	0,1690	2,0577	0,8528	0,0260	(0,0155)	(0,0352)

DISCUSSIONS

Profils de la conductivité électrique dans les trois bacs

La figure 5 ci-après illustre les profils de la conductivité électrique dans les trois bacs les 02 et 29 mai et 08 et 15 juin 2019.

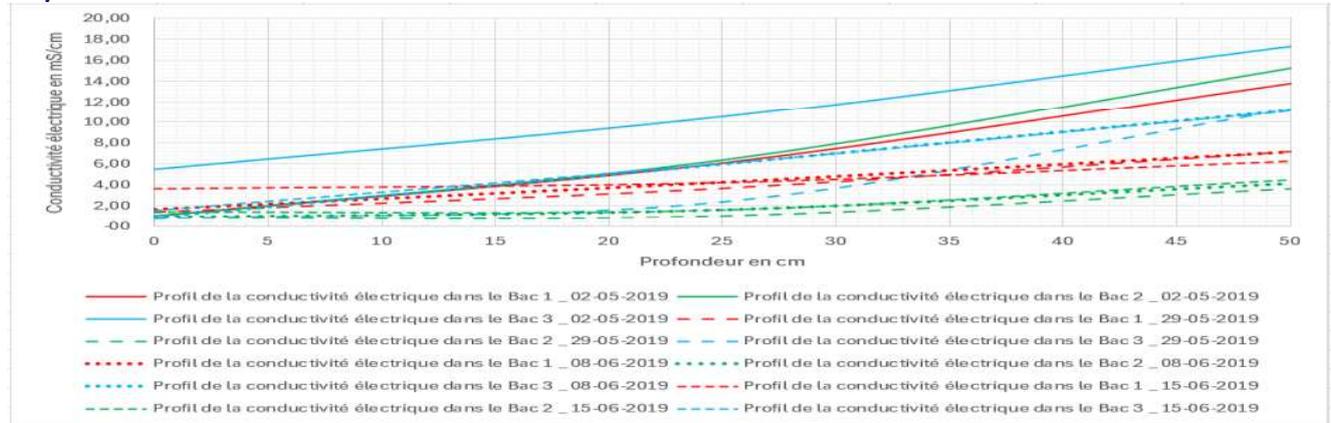


Fig. 4 : Illustration des profils de la conductivité électrique dans les trois bacs les 02 et 29 mai 2019

Elle montre que quel que soit la date et le bac choisis, la conductivité électrique croît avec la profondeur d'investigation sous forme d'un polynôme de second degré, dont l'équation peut être écrite sous la forme :

$$\sigma = \alpha(t) + \beta(t).z + \gamma(t).z^2 \quad (1)$$

Les coefficients α , β et γ sont fonctions du temps t de lessivage des sols. Ils décroissent avec le temps, d'où la forme étalée des courbes au fur et à mesure que progresse le processus de lessivage des échantillons de sols contaminés. Leur détermination permettra une simulation du lessivage approprié des sols contaminés et la détermination de la durée requise pour lessiver une épaisseur de terre salée sulfatée acide donnée.

En outre, cette conductivité électrique étant électrolytique et liée aux concentrations molaires des ions présents dans la solution de sol et l'eau de surface par la loi générale de Kohlrausch (Eq. 2 et 3), les profils mettent en exergue un gradient de concentrations ionique favorable à la diffusion osmotique des solutés les plus mobiles du fond vers la surface.

$$\sigma = \sum_i \lambda_i * C_i \quad (2)$$

et

$$\lambda_i = \mu_i * |Z_i| * F \quad (3)$$

avec σ la conductivité électrique en S/m , λ_i la conductivité molaire ionique de l'ion i en $S * m^2/mol$, C_i la concentration molaire de l'ion i en mol/m^3 , Z_i le nombre de charge électrique de l'ion i (sans unité), μ_i la mobilité ionique de l'ion i en m/s et $F = 96\,500$ Coulombs/mol le Faraday.

En sus, ils montrent que même si les échantillons transférés sont remaniés, la mise en eau des bacs a permis la stratification de la solution de sol avant sa décantation totale.

Profils du pH dans les trois bacs

La figure 6 ci-après illustre les profils du pH dans les trois bacs les 02 et 29 mai et 08 et 15 juin 2019.

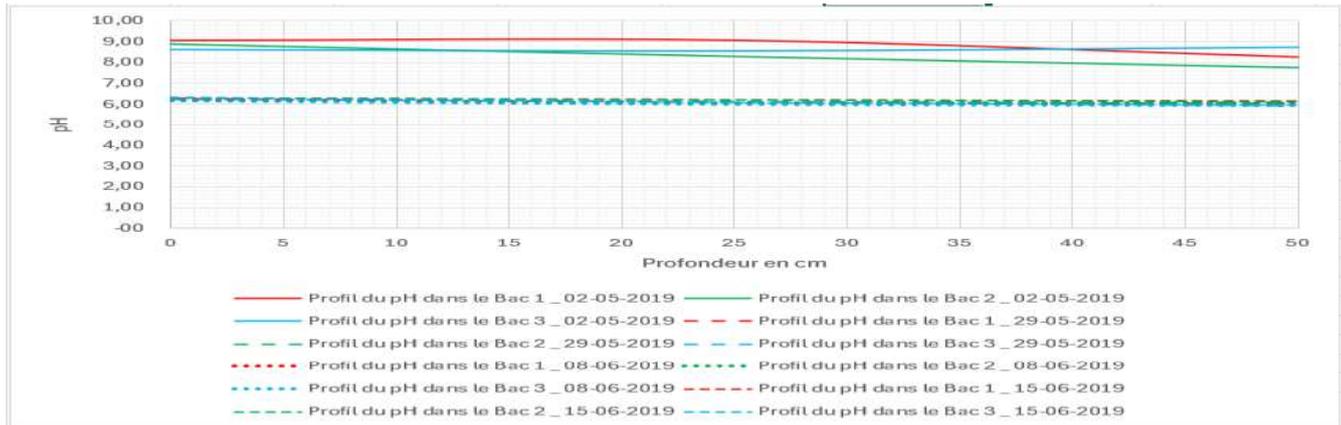


Fig. 6 : Illustration des profils du pH dans les trois bacs les 02 et 29 mai et 08 et 15 juin 2019

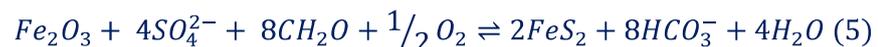
Elle montre que le pH dans les trois bacs passe d'un faciès basique (8 – 9,04) le 02 mai 2019 à acide (5,98 – 6,15) le 15 juin 2019. En sus, au fur et à mesure que le lessivage des échantillons de sols progresse, l'acidité croît linéairement dans les trois bacs avec la profondeur (Eq. 4) :

$$pH = \delta(t) + \varphi(t).z \quad (4)$$

Les coefficients δ et φ sont fonctions du temps t de lessivage des sols. Leur détermination permettra de simuler et prédéterminer la variation du pH en fonction du temps de lessivage d'un sol contaminé bien déterminé.

En outre, ces résultats confirment la diffusion des solutés des couches inférieures vers l'eau de surface ([23]). En effet, la zone d'emprunt des échantillons de sols était colonisée par une forêt de mangrove qui a disparu suite aux différentes sécheresses traversées par le pays et à une transformation pédologique des sédiments. La pénétration moins profonde des eaux marines dans la forêt de palétuviers et leur évaporation prolongée ont augmenté la salinité des sédiments au cœur du peuplement. Les rhizophoras, moins tolérants ont disparu et ont été remplacés par les avicénias. La salinisation des sédiments s'intensifiant, les avicénias ont été également affectés et ont laissé place à des surfaces nues sursalées (les tannes vifs). L'évaporation prolongée favorisant leur aération, des bactéries sulfato-oxydantes se développent et transforment les dépôts sulfurés en Jarosite. Cette transformation s'accompagne d'une forte acidification du milieu ([24]) décrite par les équations Eq.5, 6 et 7.

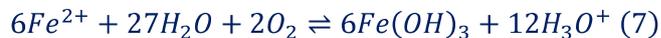
La pyrite est formée à partir de plusieurs étapes, mais l'équation globale (Equation 5) de sa formation est ([25], [26]) :



Quand l'oxygène pénètre le sol et entre en contact avec un sédiment de pyrite réduite, la pyrite est oxydée selon l'équation 6 ([25], [26]) ci-dessous :



En sus, les ions ferreux libérés (Equation 6) sont à leur tour oxydés en hydroxydes ferriques selon l'équation 7 ci-dessous ([25], [26]) :



D'où l'augmentation de l'acidité avec la progression du lessivage des échantillons de sols et la profondeur d'investigation. Ces résultats confirment ceux obtenus par le programme ILACO en Basse Casamance ([27]). Selon ([28]), l'échec dudit programme est lié à la non-maitrise de la croissance de l'acidité des sols lessivés.

Variation du pH et de la conductivité électrique dans les trois à $z = 00$ cm

Les résultats de la mesure du pH et de la conductivité électrique dans les trois bacs à $z = 00$ cm en fonction du temps de lessivage des échantillons de sols sont illustrés dans la figure 7.

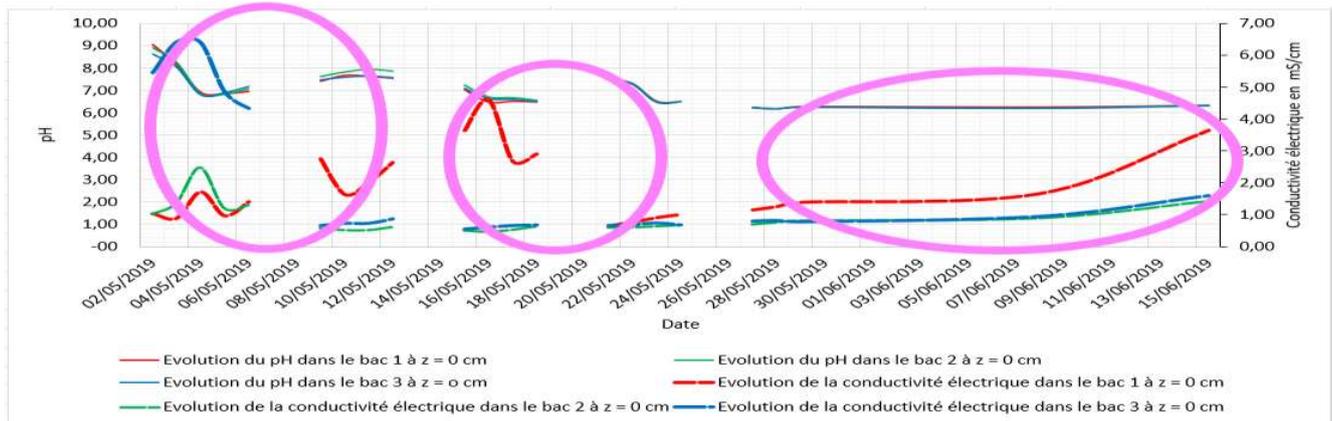


Fig. 7 : Illustration de la variation du pH et de la conductivité électrique dans les trois bacs à $z = 00$ cm

Elle montre qu'après chaque renouvellement de l'eau dans les Bacs 2 et 3 ou compensation des pertes par évaporation et évapotranspiration dans le Bac 1, le pH passe d'un faciès basique à acide. Cependant, il croit régulièrement après l'arrêt du renouvellement de l'eau des Bacs 2 et 3 et la compensation des pertes dans le Bac 1. En effet, l'eau du réseau de distribution de la ville de Dakar étant légèrement basique, le passage d'un faciès basic à acide après chaque renouvellement ou compensation est due à la diffusion des ions H_3O^+ issus de l'oxydation de la pyrite (ci-dessus décrite) du fond vers la surface. En outre la légère diminution de l'acidité après l'arrêt des renouvellements d'eau et des compensations est liée à une diminution de la diffusion des ions H_3O^+ à cause de la croissance des concentrations des autres ions présents dans l'eau de surface.

Par ailleurs, après une vidange et un renouvellement de l'eau des Bacs 2 et 3, la conductivité électrique croît sous forme d'une gaussienne jusqu'à 6,43 mS/cm (Bac 3) avant de chuter brusquement à 1.01 mS/cm (Bac 2) et 0.66 mS/cm (Bac 3) respectivement ; tandis que dans le bac témoin, elle croît progressivement sous forme de gaussiennes jusqu'à atteindre un maximum (4,61 mS/cm) après la troisième compensation avant de chuter brusquement à 0.64 mS/cm et remonter à 1.00 mS/cm. Après l'arrêt du renouvellement de l'eau des bacs 2 et 3 et de la compensation des pertes dans le bac témoin, la conductivité électrique croît progressivement sous-forme d'une parabole dans tous les bacs.

Les gaussiennes notées pendant le lessivage des échantillons de sols confirment les expériences de Vizier ([29], [30]) dans des sols acides saturés d'eau. Vizier démontre que le début de saturation du sol est caractérisé par une baisse du potentiel d'oxydo-réduction, une augmentation du pH pour les sols acides et une rapide croissance des teneurs en fer réduit dans la solution de sol et la phase liquide. La conductivité électrique étant électrolytique, elle croît au début de la saturation. Au-delà d'un certain temps de saturation (variable suivant les sols) on note une stabilisation des valeurs du potentiel rédox, du pH, des teneurs en fer réduit et une immobilisation progressive partielle du fer ferreux attribuée à la formation de composés de fer moins solubles (hydroxydes ferroso-ferriques) ou l'adsorption du fer ferreux dans la solution de sol et une diminution dans la phase liquide. D'où la décroissance de la conductivité électrique.

Quant à la chute brusque de la conductivité électrique dans les Bacs 2 et 3 lors des renouvellements de l'eau, elle est liée à la combinaison des dilutions, du lessivage des ions diffusés, des effets du vent (atmosphère salée des zones côtières) et à ce qui est décrit ci-dessus. En outre, dans le bac témoin, la chute brusque de la conductivité électrique est plutôt liée à la combinaison des dilutions de compensation des pertes, des effets du vent et de la stabilisation et l'immobilisation progressive partielle des fers ferreux dans la solution de sol.

Par ailleurs, la croissance de la conductivité électrique observée dans les trois bacs après l'arrêt des renouvellements d'eau et des compensations des pertes est liée à l'accumulation des solutés diffusés de la solution de sol vers l'eau de surface. Elle montre que la dilution et le lessivage sont les facteurs les plus influents de la récupération des sols contaminés. D'ailleurs, la dilution de la solution de sol par les eaux de pluies explique l'absence des phénomènes de salinisation naturelle des basses terres des zones soudanaises et équatoriales.

Variation du pH et de la conductivité électrique dans les trois à $z = 50$ cm

Les résultats de la mesure du pH et de la conductivité électrique dans les trois bacs à $z = 50$ cm sont illustrés dans la figure 8.

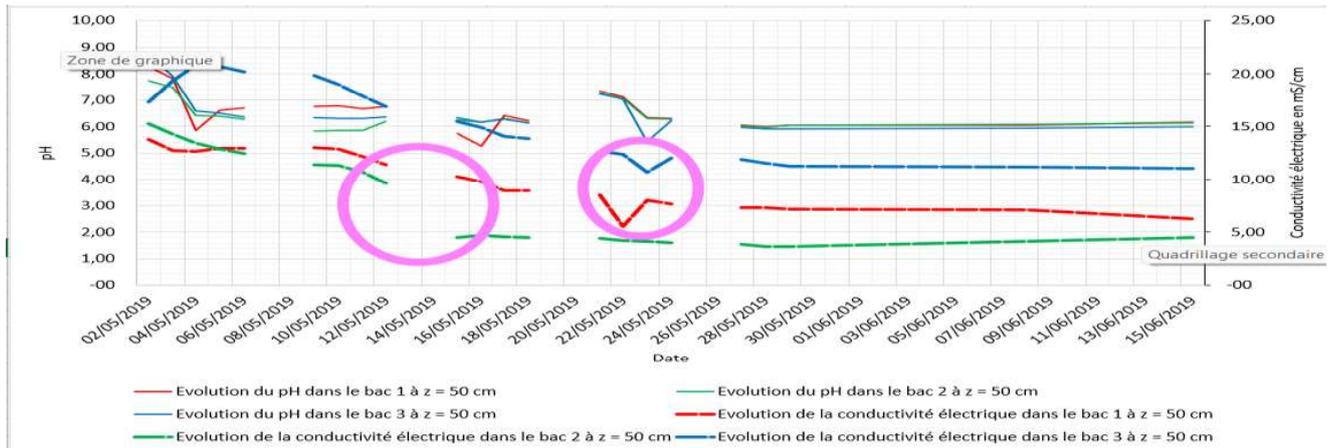


Fig. 8 : Illustration de la variation du pH et de la conductivité dans les trois bacs à z = 50 cm

Après trois renouvellements de l'eau dans le Bac 2, la conductivité électrique est passée progressivement de 15,27 mS/cm à 9,62 mS/cm, avant de chuter brusquement à 3,63 mS/cm. Après l'arrêt du renouvellement de l'eau, elle a remonté progressivement jusqu'à 4,49 mS/cm. Dans le Bac 3, après trois vidanges et renouvellement de l'eau, la conductivité électrique est passée progressivement de 17,30 mS/cm à 10,70 mS/cm avant de remonter légèrement à 12,00 mS/cm. Après l'arrêt du renouvellement de l'eau, la conductivité a progressivement continué de baisser jusqu'à atteindre 11,07 mS/cm. En outre dans le bac témoins, la conductivité électrique est passée progressivement de 13,73 mS/cm à 5,63 mS/cm avant de remonter à 7,12 mS/cm. Après l'arrêt des compensations des pertes par évaporation et évapotranspiration, elle a continué de baisser progressivement jusqu'à 6,28 mS/cm.

Au vu de la pente moyenne de décroissance de la conductivité électrique dans les Bac 1 et 3, nous pouvons dire que les chutes brusques notés sont des erreurs de mesures. Le fait qu'elle n'est pas descendue à moins de 4 mS/cm, est lié au blocage des ions métalliques lourds et chélatés par les barrières anti-osmotiques. Quant à la chute brusque de la conductivité électrique après trois vidanges et renouvellements de l'eau dans le Bac 2, elle est due au drainage des ions métalliques victimes des barrières anti-osmotiques lors des vidanges. En outre la remontée notée après l'arrêt des renouvellements est due à la diffusion des solutés mobiles des couches inférieures, non-drainés.

En conclusion, les systèmes équipés de réseaux de drainage des sols semblent plus performants dans les processus de récupération des sols salés sulfatés acides que ceux n'en disposant pas. Ainsi, les ouvrages anti-sel traditionnels diolas étant équipés d'un drain principal collecteur des eaux souterraines, ils semblent plus performants que ceux modernes.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Au vu des résultats obtenus nous pouvons dire qu'en quatre vidanges et renouvellements d'eau dans le Bac 2, la conductivité électrique à 50 cm est devenue favorable à la riziculture (3,63 mS/cm) ; tandis les quatre vidanges et renouvellement ou compensations d'eau dans les bacs 3 et 1 n'ont pas permis aux lessivages des échantillons de sols d'être favorables à la riziculture à 50 cm. Ainsi, malgré la limitation de la diffusion des solutés les plus mobiles et la suppression du drainage des ions métalliques par la résurgence de la nappe du plateau dans le bas-fond, les barrages et digues anti-sel équipés de système de drainage sont plus performant que ceux modernes qui n'en disposent pas. Les ouvrages traditionnels diolas semblent plus performants dans les processus de récupération des sols salés sulfatés acides du pays. Ces résultats méritent une confirmation sur le terrain.

Références

- [1] Centre de Suivi Ecologique (Sénégal), Rapport sur l'état de l'environnement au Sénégal, Edition 2020, 2020, pp.118-131
- [2] S. Sadio, Pédogénèse et potentialités forestières des sols sulfatés acides salés des tannes du Sine – Saloum, Sénégal, Editions de l'ORSTOM, 1991, pp.1-128

- [3] J. P. Montoroi, Dynamique de l'eau et géochimie des sels d'un bassin versant aménagé de Basse-Casamance (Sénégal) : Conséquence sur la gestion durable de l'écosystème de mangrove en période de sécheresse, Thèse de Doctorat Université Nancy I, 1994, pp.21-75
- [4] P. Boivin et D. Brunet, Bilan de quatre années de suivi de la salure d'une vallée aménagée anti-sel par conductivité Électromagnétique et Krigeage, Rapport de campagne, Editions ORSTOM, 1990, pp.1-12
- [5] J. Albergel, D. Brunet, G. Dubee, J. P. Montoroi, P. Zante, Gestion d'un barrage anti-sel en Basse Casamance (Sénégal) : utilisation rationnelle de l'eau des petits bassins versants en zone aride. Editions AUPEL-UREF (1991), 275-285
- [6] B. Barry et J. L. Posner, Bilan de trois années de suivis hydroagricoles du barrage – écluse de Guidel, Basse Casamance (Sénégal), à présenter au IIIème Symposium International sur les sols sulfatés acides, Dakar, janvier 6-11-1986 (1985) 1-21
- [7] L. Diédhiou, Projet de développement et représentations sociales en Basse Casamance : le DERBAC et le PROGES, Thèse de Philosophie Doctor (Ph.D) en sociologie, Université de Montreal, 2001, pp.252-298
- [8] A. D. Bama - Nati, B. V. Bado, S. Sambou, V. Mel et C. B. Gaye, Rice farming in saline lowland of Sahel: combinaison of anti-salt dam, salt tolerant varieties fertilizers to improve yields – African Journal of Agricultural Research. Vol.10(23)(2015), 2378-2388
- [9] D. A. Bama - Nati, Impact de la variation pluviométrique sur la salinisation des bas-fonds côtiers et processus de leur récupération pour la riziculture : cas des bas-fonds du Sine-Saloum au Sénégal, Thèse de doctorat unique, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, 2016, pp.151
- [10] T. Diop, R. Ndiaye, S. A. Sow et D. D. Ba, Analyse des effets du phosphogypse et du fumier sur la salinité de la cuvette de Ndiol dans le Delta du fleuve Sénégal – Afrique Science 15(4)(2019) 71-80
- [11] D. Fall, Contribution à l'amélioration de la tolérance à la salinité de *Senegalia Senegal* (L) Britton, *Vachellia Seyal* (Delile), *P. Hurter* et *Prosopis juliflora* (Swart) DC par inoculation microbienne et apports de coques d'arachides, Thèse de Doctorat Unique, UCAD, 2016, pp. 175
- [12] M. Thiao, G. Sène, M. Ndiaye, et E. H. S. N. Sylla, Assessment of the potential of *Vachellia Seyal* and *Prosopis chilensis* for the reclamation fo saline soil lands in the peanut basin production of Senegal, *Front. Plant. Sci.* 13 :1001895 (2022) 1-25
- [13] A. T. Sèye, E. Faye, A. Thiam, F. Matty et B. Sambou, Effet d'un dispositif biomécanique sur la récupération des sols salés et la culture du riz dans le bassin fluviomarain du Sine Saloum à Ndooff (Sénégal), *Journal of Applied Biosciences* 130(2018) 13162 – 13174
- [14] D. Fall, N. Bakhom, F. Fall, F. Diouf, M. O. Ly, M. Diouf, D. Guilley, V. Hocher et D. Diouf, Germination, growth and physiological responses of *Senegalia Senega* (L) Britton, *Vaclullia Seyal* (Delile) P., Hurter and *Propopis Juliflora* (Swartz) DC to salinity stress in greenhouse conditions, *African Journal of Biotechnology*, Vol.15 (37)(2016) 2017 – 2027
- [15] E. H. M. BA, Etude des propriétés biomécaniques et de la capacité de vie symbiotique des racines d'arbre d'acacia *Senegal Willd* et de *prosopis juliflora* DC, Thèse de doctorat de l'Université Bordeaux I / UCAD, 2008, pp.1-122
- [16] O. N. Faye, T. Guèye et A. Dieng, Effets de la salinité sur différentes variétés de riz durant leur phase végétative, *Afrique Science* 13(1)(2017) 101-117
- [17] Y. Maiga, G. Mawussi, O. N. Faye et A. Faye, Screening of Rice Lines (*Oryza sppL.* 1753) for Salinity Tolerance at Vegetative Stage under Senegal River Valley Conditions, *Journal of Experimental Agriculture International* 42(4)(2020) 71-81
- [18] T. SANE, Vulnérabilité et adaptabilité des systèmes agraires à la variabilité climatique et aux changements sociaux en Basse-Casamance (Sud-Ouest du Sénégal), Université Sorbonne Paris Cité, Université Cheikh Anta Diop, 2017, pp.282-305
- [19] H. Bonnefond, Développement agricole et blocages techniques en Basse Casamance, Editions ORSTOM 9–10 (1987) 95-109
- [20] B. Bovin et J. Y. LOYER, Evolution des sols salés de mangrove du périmètre réaménagé de Soukouta I au cours de la saison des pluies 1984 (Vallée de Guidel – Casamance), Editions ORSTOM, 1985, pp.1-15
- [21] C. Marius, Evolution géochimique et exemple d'aménagement des mangroves au Sénégal (Casamance), *OCEANOLOGICA ACTA*, SP (1982)151-160

- [22] A. K. Kwaw, W. Zhu., Z. Dou., J. Wang, P. A. Opoku et Y. Zhang, Influence of Clay on Solute Transport in Saturated Homogeneous Mixed Media, *Hindawi Geofluids* (2021)(2021) 1-14
- [23] P. PELISSIER, Les paysans du Sénégal : Les civilisations agraires du Cayor à la Casamance, Université de Bordeaux, 1966, pp.407-508
- [24] J. Vieillefon, Les sols des mangroves et des tannes de Basse-Casamance (Sénégal) : Importance du comportement géochimique du soufre dans leur pédogenèse, *Mém. ORSTOM*, Paris, 1977, pp.65-89
- [25] P. M. Drissen et R. Dudal, Lecture notes on the geography, formation, properties and use of major soils of the world, *Agricultural Katholieke I, Universiteit – Wageningen – Leuven*, 1989, pp.93-104
- [26] P. M. Drissen et J. Deckers, Lecture notes on the major soils of the world - FAO, Rome, 2001, pp.105-114
- [27] ILACO, Aménagements hydro-agricoles en Casamance, Rapport de gestion des casiers de Médina et de Ndiéba (1965- 1967). Min. Econ. Rurale Sénégal/ILACO, 1967, pp.29-60
- [28] B. Barry et J. L. POSNER, Suivi hydro-agricole du barrage anti-sel de Guidel : Actes du séminaire sur « L'estuaire de la Casamance : environnement, pêche, socio-économie », Ziguinchor, Juin 19-24 (1986) 291-305
- [29] J. F. Vizier, Etude de la dynamique du fer dans des sols évoluant sous l'effet d'un excès d'eau, Etude expérimentale sur des sols de rizières de Madagascar, *Cah. ORSTOM*, XVI (1)(1978) 23-41
- [30] J. F. Vizier, La toxicité ferreuse dans les sols de rizières, Importance du problème, causes et mécanismes mis en jeu, conséquences pour l'utilisation des sols, Antenne ORSTOM auprès du CEA, Fonds Documentaires, 1988, pp.1-13