

Rapport préliminaire sur l'état de conservation des sols agricoles dans le delta du fleuve Sénégal.

Auteur: Manuel Antonio González Pérez (professeur du Domaine de Génie Agroforestier de la Section de Génie Agraire).

Introduction:

La consommation de riz par la population sénégalaise en fait un aliment de base; en 2000, le chiffre était de 115 kg de riz par personne. Malgré la production propre du pays, il est nécessaire d'importer cette céréale, la souveraineté alimentaire n'est donc pas assurée.

Le delta du fleuve Sénégal abrite les deux tiers des rizières du pays qui, avec celles du reste du pays, produisent environ 350 000 tonnes de riz par an; d'autre part, pour compléter leur propre consommation, le pays doit importer environ 1 500 000 tonnes de riz par an (Euronews, 2016).

Pour atteindre la souveraineté alimentaire, il est nécessaire d'étudier l'état de conservation des sols dans le delta du Sénégal. Ceci est indispensable si l'on veut augmenter les surfaces cultivées et améliorer leur productivité.

Afin de déterminer l'état de conservation du sol, il est indispensable de recueillir des données préliminaires sur la résistance à la pénétration et la teneur en humidité, ainsi que l'analyse d'un échantillon de sol provenant d'une parcelle représentative où l'on cultive du riz. Pour réaliser ce travail, une zone est sélectionnée au sein du GIE de Ross-Béthio.

Pour la prise de données et l'échantillonnage du sol, deux étudiantes du Département de Philologie Classique, Française, Arabe et Romane de l'Université de La Laguna ont été élues pour le voyage d'échange programmé dans le cadre du projet AGRO_FEM, code MAC2/2.3d/292. Ces étudiantes ont eu la collaboration des membres du GIE de Ross-Béthio.

Matériels et méthodes:

Pour l'échantillon de sol à soumettre à une analyse physico-chimique complète, 10 à 20 sous-échantillons de quelques grammes sont extraits de la parcelle sélectionnée, en suivant une trajectoire en zigzag sur la parcelle entre sous-échantillon et sous-échantillon, de manière à couvrir l'ensemble de la zone (figure 1).

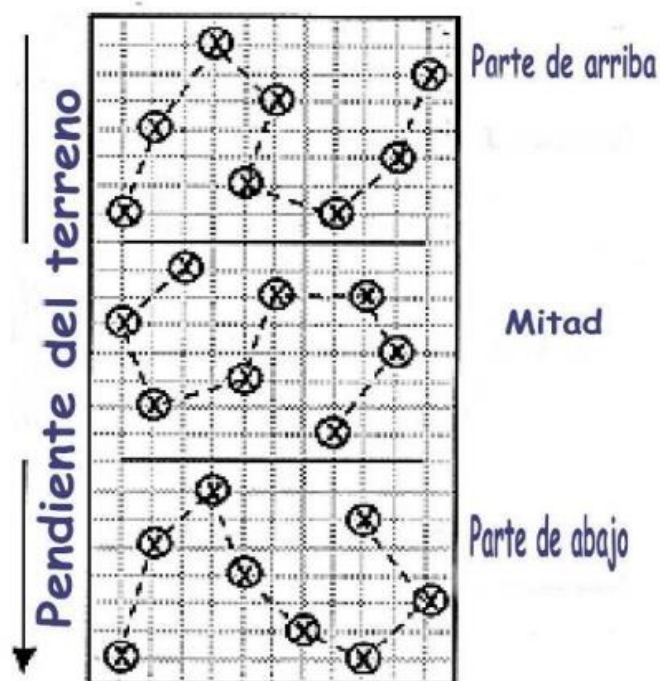


Figure 1 : Sous-échantillonnage de la parcelle.
Source : Santos, B. et al, 2017.

Les sous-échantillons sont pelletés à une profondeur de 20-30 cm et mélangés dans un seau pour obtenir un échantillon de sol final homogène de 1 à 1,5 kg qui est représentatif de la parcelle (Santos, B. et al., 2017).

Trois parcelles sont sélectionnées au GIE de Ross-Béthio, d'environ 3 000 m² chacune, avec des conditions d'humidité du sol différentes. L'échantillon unique est prélevé sur ces trois parcelles.

Un pénétromètre Eijkelkamp à commande manuelle est utilisé pour mesurer la résistance à la pénétration du sol (figure 2).

L'appareil se compose d'un cône fixé à l'extrémité d'une tige munie d'une extension, qui se connecte à un piston et à une tête de mesure à l'extrémité opposée et qui est munie de poignées pour l'utilisation.

La personne qui manipule l'appareil doit appliquer une pression uniforme, en enfonçant le cône verticalement dans le sol à une vitesse constante recommandée de 2 cm/s. Les relevés sont effectués tous les 5 cm de profondeur, entre 0 et 100 cm, il y a probablement une profondeur au-delà de laquelle les forces sortent de la plage de mesure.

La plage de mesure va de 100 à 1000 N, les mesures de 0 à 100 N ne sont pas subdivisées en raison de leur faible fiabilité, les mesures de 100 à 200 N ont un écart moyen de +/- 15%, les mesures de 200 à 700 N ont un écart moyen de +/- 8%, cette plage est recommandée pour une utilisation longue et fiable, les mesures de 700 à 1000 N s'usent et raccourcissent la durée d'utilisation de l'appareil et ne sont donc pas recommandées.



Figure 2 : Pénétrömètre de marque Eijkelkamp, à commande manuelle.
Source : Élaboration propre.

Pour chaque lecture, l'indicateur de la tête de mesure a une aiguille noire sur le manomètre, qui entraîne l'aiguille de lecture maximale rouge qui reste ancrée, donnant la résistance maximale obtenue dans ces 5 cm.



Figure 3 : Jeu de cônes du pénétromètre Eijkelkamp.
Source : Élaboration propre.

L'appareil comporte 4 cônes circulaires en acier inoxydable (figure 3), avec une conicité de 30° et un axe de symétrie centré pour la manipulation, conformément à la norme ASAE S313.3 FEB1999ED, qui diffèrent par leur surface de base et leur diamètre (tableau 1):

Tableau 1: Caractéristiques des cônes.

Source : Eijkelkamp, 2018.

CÔNE	SURFACE cm ²	BASE	DIAMÈTRE mm
N°1	1		11,28
N°2	2		15,96
N°3	3 1/3		20,60
N°4	5		25,23

Afin d'exprimer les résultats de la résistance à la pénétration en N/cm², les lectures sont effectuées en N et divisées par la surface de la base du cône utilisé en cm². Le dernier étalonnage date du 14-12-2018 et l'appareil se situe dans la déviation moyenne de +/- 8%.

Tableau 2 : Étalonnage de l'équipement.

Source : Eijkelkamp, 2018.

Valeur nominale (N)	Valeur de lecture (N)	Écart type standard (%)
200	216	8
400	406	3
600	590	5

Une fois qu'une valeur (par exemple 460 N) est obtenue avec un cône donné (par exemple n° 4), diviser par la surface de la base (par exemple 5 cm²) pour obtenir la résistance du cône (par exemple 92 N/cm²).

Selon la norme ASAE EP542 FEB1999, les résultats doivent être exprimés en MPa pour l'indice de cône (CI) et en m pour la profondeur (D).

Une sonde IMKO TRIME-PICO 64/32 à deux tiges dotée de la technologie de réflectométrie temporelle (TDR) (figure 4) est utilisée pour collecter des données sur l'état d'humidité du sol (figure 4). La capacité de pénétration des lignes de flux électriques et magnétiques de cette sonde est d'environ 2 cm autour des tiges de la sonde. Il dispose également d'un appareil de mesure HD2 portable pour le contrôle de la sonde, avec un écran pour les relevés et une batterie rechargeable (figure 5). Les relevés vont de 0 à 100 % en volume de la teneur en humidité du sol.

La personne qui manipule l'appareil doit préparer à l'avance les trous pour les tiges de la sonde, à l'aide d'un gabarit, afin d'éviter qu'elles ne se plient si elles sont insérées en forçant les tiges dans le sol compacté.

Une fois les tiges insérées, le sol doit être compacté manuellement autour des tiges.

Les résultats de cette sonde indiquent la teneur en eau en l/m³, en % gravimétrique et en % volumétrique. Pour ce rapport, les données sont prises en % volumétrique.



Figure 4 : Sonde IMKO TRIME-PICO 64/32.
Source : Élaboration propre.



Figure 5 : Contrôle de la sonde portable HD2.
Source : Élaboration propre.

L'étalonnage de la sonde est effectué à la Section d'Ingénierie Agricole de l'Université de La Laguna, pour cela il est nécessaire de prélever 20 sous-échantillons d'environ 1 kg, soit un échantillon final de 20 kg (Schweizer, S. 2011).

Avec le dernier échantillon de sol, 4 pots de 5 litres chacun sont remplis et placés sur une grille de drainage et arrosés, le premier à 100% de saturation, le deuxième à 75% de saturation, le troisième à 50% de saturation et le quatrième à 25% de saturation.

Les pots restent égouttés pendant 24 heures, afin d'obtenir 4 conditions différentes d'humidité du sol. Les données sont prises avec la sonde d'humidité du sol IMKO TRIME-PICO 64/32 et avec l'appareil de mesure portable HD2, 2 lectures dans chaque pot, soit un total de 8 lectures.

Pour poursuivre le processus d'étalonnage, deux échantillons de sol sont prélevés dans chacun des quatre pots, à l'aide de cylindres ou d'anneaux de type Kopecky ; au total, huit échantillons présentant différents états d'humidité du sol sont prélevés. Chaque cylindre contient un volume d'échantillon de sol de 100 cm³ (pour l'eau, une densité de 1 g/cm³ est utilisée).

Enfin, une procédure de double pesée a été effectuée, les 8 échantillons étant conditionnés dans une étuve pour un séchage à 105-110 °C pendant 24 heures. Le tableau 3 présente les données et les résultats de la double pesée et des lectures de la sonde.

Tableau 3 : Données recueillies pour l'étalonnage de la sonde d'humidité.
Source : Élaboration propre.

Poids du sol dans chaque échantillon de 100 cm³				Lectures sonde
Poids humide (g)	W	Poids sec Ws (g)	Poids eau Ww (g)	Sonde IMKO TRIME-PICO 64/32 H (%) ó (m³/m³) 100
			H (%) = [Vw(m³)/V(m³)] 100	
170,43		109,44	60,99	37,05
170,30		112,75	57,55	36,52
164,71		118,54	46,17	27,52
165,60		122,74	42,86	27,44
129,46		102,24	27,22	10,55
151,52		122,75	28,77	10,52
125,52		104,22	21,30	9,58
133,80		111,13	22,67	9,63

Ensuite, un graphique est construit (Figure 6) avec les résultats d'humidité obtenus avec la lecture de la sonde et le test de double pesée, exprimés en (%) ou (m³/m³), ce qui permet d'observer la corrélation entre les deux, avec un coefficient de corrélation élevé.

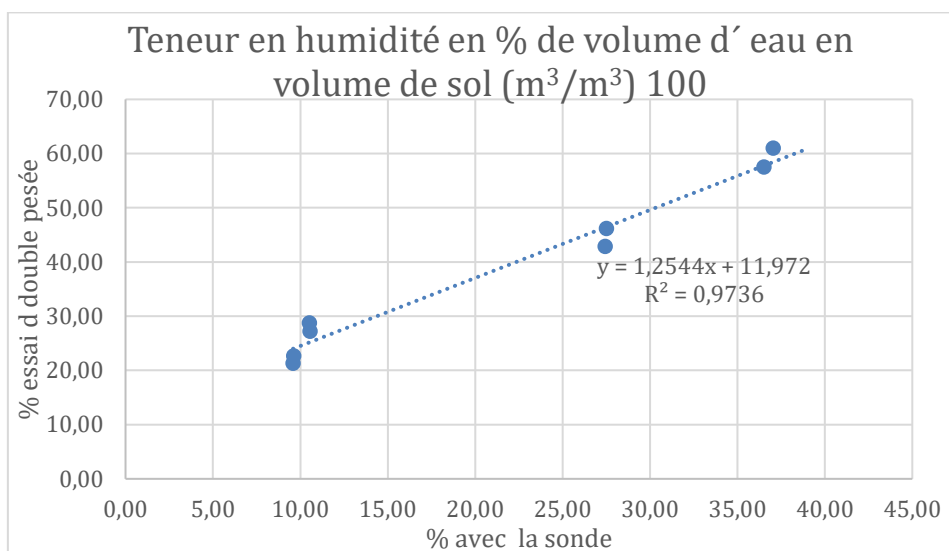


Figure 6 : Corrélation entre les données du laboratoire et celles de la sonde.
Source : Élaboration propre.

L'échantillonnage du sol et la première mesure ont été effectués le 26/01/2023 et les deux mesures suivantes ont été prises le 28/01/2023. Le personnel technique impliqué était les étudiantes de la Faculté de Philologie Française de l'Université de La Laguna, Mme Marcela María Arias Vega et Mme Laura Bethencourt Maguet (Figures 7 et 8).



Figure 7: Collecte de données sur la résistance à la pénétration sur les parcelles du GEI de Ross-Béthio.
Source : Élaboration propre.



Figure 8: Collecte de données sur l'humidité du sol sur les parcelles IEG de Ross-Béthio.

Source : Élaboration propre.

Avec les résultats obtenus, on espère déterminer pour chacune des trois parcelles comment la force de pénétration dans le sol évolue tous les 5 cm, jusqu'à la profondeur que l'on peut atteindre manuellement. A partir de ces données, on peut tracer un graphique avec l'indice de cône (Cone Index) en MPa et la profondeur (Depth) en cm, ce qui permet de déduire l'état de compactage du sol.

Ces expériences sont réalisées en mesurant l'état d'humidité du sol dans chacune des parcelles, qui sera différent, et permettra de déduire comment l'état de compactage varie en fonction de la teneur en humidité du sol.

Résultats:

Tableau 4 : Données obtenues au pénétromètre sur la parcelle 1 du GIE Ross-Béthio.

CÔNE N°: 2		DATE: 26/01/23 10 a.m				COORDONNÉES DU LIEU DE MESURE: 16,3290448, - 16, 042792				
ÉCHANTILLON	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Prof. (cm)	Force (N)	Force (N)	Force (N)	Force (N)	Force (N)	Force (N)	Force (N)	Force (N)	Force (N)	Force (N)
5		330						900	890	390
10		530	700	550	690	600	600	900	530	520
15		820	700	560	810	700	400	420	420	600
20	720	800	490	300	910	490	500	350	500	650
25	720	790	550	390	850	420	400	400	490	520
30	500	700	400	550	450	430	310	320	400	400
35	360	400	300	600	390	400	310	250	420	500
40	200	300	300	590	390	390	310	320	490	390
45	190	390	290	400	310	280	310	350	590	450
50				400				430	600	450
55									790	

Tableau 5 : Données obtenues avec la sonde d'humidité sur la parcelle 1 du GIE Ross-Béthio.

ÉCHANTILLON	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Prof. (cm)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)
5	57,56	SOL TRÈS DUR	73,28	76,28	117,70	236,52	148, 85	151,40	134,15	361,28
20	TIERRA MUY DURA.	SOL TRÈS DUR	161,23	166,84	305,60	353,57	451,15	312,39	358,25	376,56
ÉCHANTILLON	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Prof. (cm)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)
5	2,46	4,02	3,316	3,026	5,03	9,68				
20	SOL TRÈS DUR.	6,74	6,89	7,13	13,06	15,11				

REMARQUES : Parcelle non nivelée, non cultivée depuis 3 mois. Parcelle avec un taux d'humidité très bas, le sol était très sec et dur. Sol recouvert d'herbe sèche. En raison de la dureté du sol et de l'absence d'outils appropriés, il n'a pas été possible de prélever l'échantillon à une profondeur supérieure à 5-10 cm.

Tableau 6: Données pénétrométriques obtenues sur la parcelle 2 du GIE Ross-Béthio.

CÔNE N°: 3		DATE: 28/01/23 10:00h				COORDONNÉES DU LIEU DE MESURE: 16,3308977, -16,0542152				
ÉCHANTILLON	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Prof. (cm)	Force (N)	Force (N)	Force (N)	Force (N)	Force (N)	Force (N)	Force (N)	Force (N)	Force (N)	Force (N)
5	220	200	290	402	950	400	120	200	500	120
10	300	100	320	400	220	250	150	200	350	200
15	320	195	400	400	300	300	200	220	100	200
20	300	290	320	320	220	320	220	290	120	200
25	290	250	300	290	200	300	250	320	200	250
30	300	250	300	220	600	250	250	320	250	260
35	240	290		300	850	300	290	450	300	320
40	300	320		300		250	300	650	290	460
45	490	320		500		300	300		280	700
50	1000	500		900		420	800		220	
55		900				790			300	

Tableau 7: Données obtenues avec la sonde d'humidité sur la parcelle 2 du GIE Ross-Béthio.

ÉCHANTILLON	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Prof. (cm)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)
5	157,95	180,18	198,67	198,43						
20	365,74	329,00	360,36	BATTERIE DÉCHARGÉE						
ÉCHANTILLON	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Prof. (cm)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)
5	6,75	7,70	8,49	8,48						
20	15,63	14,06	15,40	BATTERIE DÉCHARGÉE						

REMARQUES : Parcelle cultivée et très humide. Irrigué à 7 heures du matin. Parcelle irriguée grâce à une pompe à eau du canal, alimentée par des panneaux solaires.

Tableau 8 : Données pénétrométriques obtenues sur la parcelle 3 du GIE Ross-Béthio.

CÔNE N°: 3		DATE: 28/01/23 12:45 p.m				COORDONNÉES DU LIEU DE MESURE: 16,3308977, -16,0542152				
ÉCHANTILLON	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Prof. (cm)	Force (N)	Force (N)	Force (N)	Force (N)	Force (N)	Force (N)	Force (N)	Force (N)	Force (N)	Force (N)
5	220	150	100	100	0	100	150	150	200	100
10	290	290	110	220	200	200	290	290	220	260
15	300	310	200	290	220	190	290	290	300	250
20	320	350	220	220	250	200	250	250	290	290
25	290	350	290	250	290	220	220	300	350	300
30	290	300	220	220	310	250	300	300	350	300
35	320	250	200	220	390	290	350	320	400	250
40	390	220	220	300	380	290	800	300	520	450
45	300	390	300	500	690	800		500		700
50	900	420	500							
55		690								

Tableau 9: Données obtenues avec la sonde d'humidité dans la parcelle 3 du GIE Ross-Béthio.

ÉCHANTILLON	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Prof. (cm)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)	Hum. (l/m3)
5	176,20	251,78	147,19	189,54	242,19	234,49	209,43	180,41	222,53	217,62
20	254,36	239,86	227,92	218,19	282,44	268,58	386,80	283,14	316,54	285,48
ÉCHANTILLON	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Prof. (cm)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)	Hum. (%)
5	7,53	10,76	6,29	8,10	10,35	10,02	8,95	7,71	9,51	9,30
20	10,87	12,43	9,74	9,32	12,07	11,22	16,53	12,10	13,54	12,20

PARCELLE: GIE de Ross-Béthio.

REMARQUES :

Parcelle à humidité moyenne. Échantillons prélevés près de 6h après l'irrigation, et 2h après la deuxième mesure.

Les valeurs moyennes des forces (N) pour chaque profondeur (cm) sont déterminées à partir de ces tableaux, puis les valeurs de Cone Index (MPa) sont calculées en utilisant la surface du cône utilisé dans chaque prise de données et pour chaque profondeur (m) conformément à la norme ASAE EP542 FEB1999 (tableaux 4, 6 et 8).

Les valeurs moyennes de l'humidité (%) en tant que volume d'eau dans le volume du sol (m³/m³) 100 sont également déterminées, en utilisant la ligne de corrélation obtenue lors de l'étalonnage de la sonde. Les données pour une profondeur de 20 cm sont utilisées car elles sont les plus fiables pour éviter une diminution de l'évaporation à la surface (tableaux 5, 7 et 9).

Enfin, les graphiques suivants sont obtenus avec les valeurs moyennes:

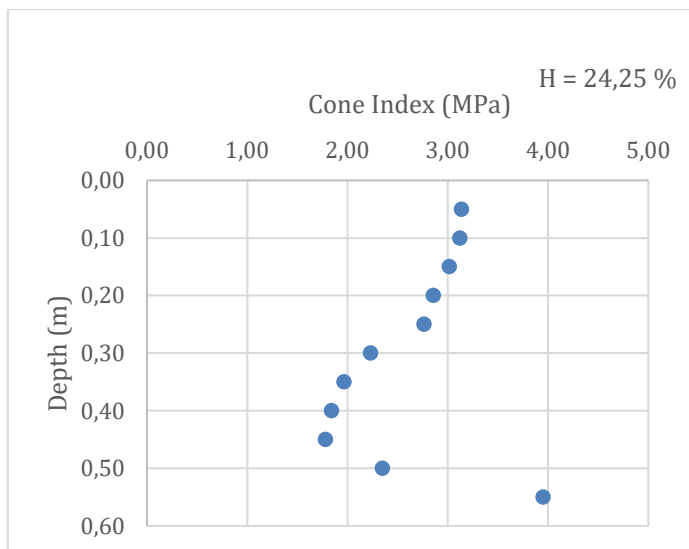


Figure 9: Graphique de l'indice de profondeur du cône pour une teneur en eau de 24,25 % de volume d'eau dans le volume du sol (m³/m³) 100, correspondant à la parcelle de données 1.

Dans cette parcelle, la résistance a une valeur de 3,14 kPa à la surface, 5 cm, qui diminue avec la profondeur jusqu'à une valeur minimale de 1,78 kPa correspondant à 45 cm, à partir de laquelle elle augmente à nouveau brusquement jusqu'à 3,95 kPa comme valeur maximale correspondant à 55 cm. Cela indique la présence d'une croûte superficielle d'environ 20 cm et d'une semelle difficile à briser à partir de 50 cm (figure 9).

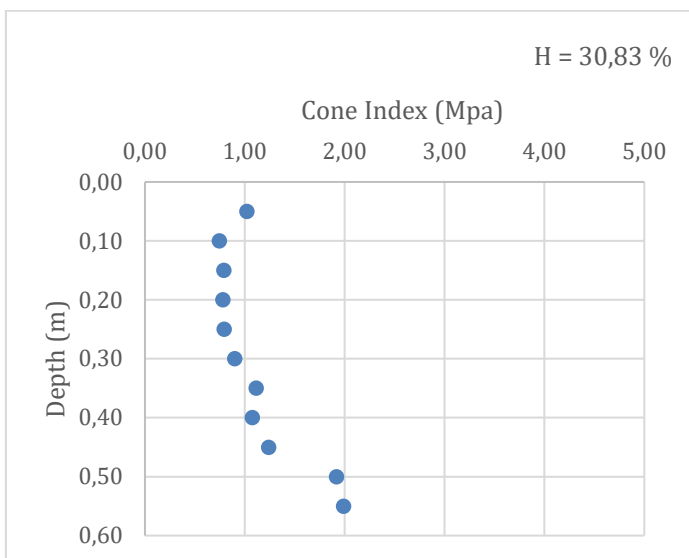


Figure 10 : Graphique de Profondeur - Index de cône pour une teneur en eau de 30,83 % du volume d'eau dans le volume du sol (m³/m³) 100, correspondant à la parcelle de données 2.

Sur cette parcelle, la résistance a une valeur de 1,02 kPa en surface, à 5 cm, qui diminue légèrement avec la profondeur pour atteindre des valeurs minimales variant entre 0,75 et 1,24 kPa à environ 45 cm, à partir desquelles elle augmente à nouveau fortement pour atteindre 1,99 kPa en tant que valeur maximale correspondant à 55 cm. Ceci indique la présence d'une croûte superficielle d'environ 10 cm et d'une semelle difficile à casser à partir de 50 cm (Figure 10).

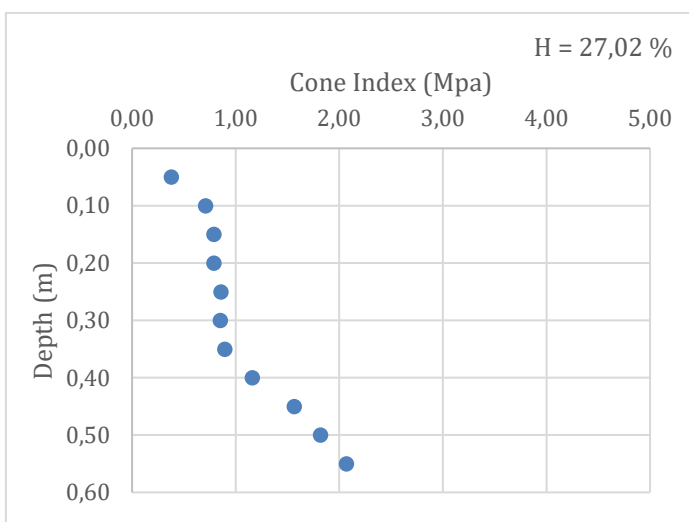


Figure 11 : Graphique de Profondeur- Index de cône pour une teneur en eau de 27,02 % du volume d'eau dans le volume du sol (m³/m³) 100, correspondant au parcelle de données 3.

Dans cette figure, la résistance a une valeur de 0,38 kPa à la surface, 5 cm, qui augmente légèrement à partir de 10 cm avec des valeurs entre 0,71 et 0,90 kPa jusqu'à 35 cm de profondeur, à partir de là, elle augmente fortement jusqu'à 2,07 kPa comme valeur maximale correspondant à 55 cm. Cela indique l'absence de croûte superficielle à partir d'environ 10 cm et une semelle difficile à briser à partir de 50 cm (figure 11).

L'échantillon de sol obtenu a été transporté au Centre de Recherches Agricoles de Saint-Louis de l'Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA). Une analyse complète a été effectuée (tableau 10). La date de livraison des résultats de laboratoire était le 08-05-2023.

Tableau 10 : Résultats de l'analyse du sol. Source : ISRA.

N°	Nom échantillon	pH eau (1/2,5)	pH KCl (1/2,5)	CE ($\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$)(1/2,5)							
1	GIE Ross Béthio	6,32	5,61	2.530							
pH: potentiel hydrogène ; CE : Conductivité Electrique											
pH	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	
Degré	Très acide	Acide		Peu acide		Neutre		Peu alcalin		Alcalin	
Conductivité électrique						Niveau de salinité					
>4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$						Sol extrêmement salé					
2000-4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$						Sol très salé					
800-2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$						Sol Moyennement salé					
400-800 $\mu\text{S}/\text{cm}$						Sol Légèrement salé					
<400 $\mu\text{S}/\text{cm}$						Sol non salé					
N°	Nom échantillon	C (%)	N (%)	C/N	MO (%)	Pass (ppm)					
1	GIE Ross Béthio	0,179	0,029	6.131	0,308	2,480					
C: Carbone N: Azote MO: Matière organique Pass: Phosphore assimilable											
N°	Nom échantillon	Na ⁺ (meq/100g)	K ⁺ (meq/100g)	Ca ²⁺ (meq/100g)	Mg ²⁺ (meq/100g)	CEC (meq/100g)					
1	GIE Ross Béthio	4,621	0,266	2,787	0,900	9.205					
Na: sodium K: potassium Ca: calcium Mg: magnesium											
N°	Nom échantillon	Fe ²⁺ (ppm)	Mn ²⁺ (ppm)	Cu ²⁺ (ppm)	Zn ²⁺ (ppm)						
1	GIE Ross Béthio	0,131	trace	0,024	trace						
Fe: fer Mn: manganèse Cu: cuivre Zn: zinc											
N°	Nom échantillon	% L	% A	% SG	% SM	% SF	Texture				
1	GIE Ross Béthio	12,5	8,2	1,0	6,5	71,8	Sable limoneux				
L: limon A: argile SG: sable grossier SM: sable moyen SF: sable fin											

Conclusions:

Comme prévu, la résistance la plus élevée, l'indice de cône, est observée dans la parcelle ayant la teneur en eau la plus faible, suivie de la parcelle ayant une teneur en eau moyenne et enfin de la parcelle ayant la teneur en eau la plus élevée.

La présence de la croûte est significative dans la parcelle ayant le taux d'humidité le plus bas ; cependant, dans les autres parcelles, le comportement de la croûte n'est pas comme prévu, probablement en raison de la courte période d'attente entre les irrigations et la collecte des données, bien que la parcelle ayant le taux d'humidité le plus élevé indique la présence d'une croûte de résistance légère qui ne devrait pas être présente.

Dans les trois parcelles, les valeurs maximales de l'indice de Cône sont observées à partir d'une profondeur de 50 cm, ce qui indique la présence d'un sol difficile à briser, probablement généré par le passage des machines, atteignant une valeur de 3,95 kPa pour une profondeur de 55 cm dans la parcelle 1, qui est la parcelle avec le taux d'humidité le plus bas.

La semelle apparaît à 50 cm de profondeur, dans la parcelle 2 on observe une valeur de 1,92 kPa pour 30,83 % d'humidité, dans la parcelle 3 on observe une valeur de 1,82 kPa pour 27,02 % d'humidité et dans la parcelle 1 on observe une valeur de 2,35 kPa pour 24,25 % d'humidité.

Cela indique que pour diminuer la présence de la semelle, les teneurs en humidité doivent être supérieures à ces valeurs, car la différence observée est minime.

Tableau 11 : Résultats obtenus pour une profondeur de 20 cm

Depth (mm)	Moisture content (%)	Cone Index (MPa)
200	24,25	2,86
200	27,02	0,79
200	30,83	0,78

Les valeurs de l'indice de cône, entre autres facteurs, dépendent de la composition du sol et du maintien ou non d'un travail du sol conventionnel.

Ces données peuvent être comparées aux résultats obtenus à 200 mm de profondeur lors d'expériences menées sur des sols du Manitoba (Canada) (tableau 12), pour des parcelles situées à Brandon, sols non travaillés NT (No-tillage) et à Oakville, sols travaillés conventionnellement CT (Conventional tillage).

Tableau 12 : Indice de cône pour les sols de Manitoba (Canada).
Source : Kumar, A. et al, 2012.

	Moisture content (%)	Cone Index (MPa)	Sand: sable (%)	Silt: limon (%)	Clay: argile (%)
Brandon No-tillage	23,15	2,23	36	32	32
	27.82	1,87	34	30	36
	30.61	1,63	31	36	33
		Promedio:	33,67	32,67	33,67
Oakville Conventional tillage	25,02	0,20	4	19	77
	27,13	0,43	4	19	77
	30,19	0,62	4	19	77
		Promedio:	4,00	19,00	77,00

Si l'on compare les résultats obtenus dans nos parcelles avec le tableau précédent, pour une profondeur de 200 mm et l'humidité la plus proche, on constate que l'indice de cône obtenu dans les deux expériences est très différent, de sorte que l'on peut dire que ces valeurs dépendent de la composition du sol et de l'utilisation de techniques de travail du sol conventionnelles ou sans labour.

De l'analyse physico-chimique du sol, il convient de mettre en évidence les résultats du pH et de la conductivité. Pour déterminer le pH et la conductivité du sol, une suspension de 20 g de "terre fine" dans 50 ml d'eau distillée (1/2,5) est réalisée.

La conductivité est de 2 530 $\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1}$ ce qui correspond à un sol très salé (Tableau 10), selon Hurtado et al. (2021) cela correspond à un sol salin.

Le résultat du pH est de 6,32, ce qui correspond à un pH peu acide (tableau 10), selon Hurtado et al. (2021), cela correspond à un sol légèrement acide. Cela indique qu'il y a une prédominance de cations d'hydrogène dans le sol. Dans le cas du delta du fleuve Sénégal, ceci est probablement dû à l'abondance des précipitations et à la technique d'irrigation par inondation utilisée dans les rizières.

L'analyse montre que le résultat pour C (%) est de 0,179 (Tableau 10). Ce type de sols avec moins de 0,5% de C organique est caractéristique des zones désertiques.

Des données importantes sont la quantité d'azote 0,029% et le rapport C/N 6,131 (Tableau 10), selon Hurtado et al. (2021) il s'agit d'un sol très pauvre en azote et la capacité de minéraliser ou de produire des nitrates est élevée. D'après la faible teneur en matière organique, OM (%) = 0,308, selon Hurtado et al. (2021), il s'agit également d'un sol très mal approvisionné, on en déduit l'absence de micro-

organismes qui fixent l'azote, donc il n'y a pas de présence d'azote ammoniacal (organique) ni d'azote nitrique (minéral).

L'azote peut également être affecté par l'abondance des précipitations et la technique d'irrigation par inondation utilisée dans les rizières. Par exemple, les besoins en N du riz cultivé en Espagne, pour obtenir un rendement de 5-7 t/ha avec les doses habituelles d'engrais appliquées, sont de 20-24 ‰.

Le résultat pour le phosphore assimilable est de 2 480 ppm avec la méthode d'extraction Olsen modifiée selon Dabin (Tableau 10), une valeur inférieure à 10 ppm est considérée comme faible (Cropaia, 2023). Selon Hurtado et al. (2021), il s'agit également d'un sol très pauvre en P. Selon Urbano Terrón (1989), il s'agit d'un sol pauvre.

Le résultat Na^+ est de 4,621 (meq/100g) avec la méthode d'extraction à l'acétate d'ammonium (Tableau 10), soit 1062,3679 ppm. Selon Cropaia (2023), elle est considérée comme excessive. C'est un indicateur de salinité excessive.

Le résultat pour le K^+ est de 0,266 (meq/100g) avec la méthode d'extraction à l'acétate d'ammonium (Tableau 10), soit 104,006 ppm. Selon Urbano Terrón (1989), il s'agit d'un sol moyen. Selon Cropaia (2023), il est considéré comme faible.

Le résultat de Ca^{2+} est de 2,787 (meq/100g) avec la méthode d'extraction à l'acétate d'ammonium (Tableau 10), soit 558,5148 ppm. Selon Urbano Terrón (1989), il s'agit d'un sol très pauvre. Selon Cropaia (2023), il est considéré comme faible.

Le résultat pour Mg^{2+} est de 0,900 (meq/100g) avec la méthode d'extraction à l'acétate d'ammonium (Tableau 10), soit 109,35 ppm. Selon Urbano Terrón (1989), il s'agit d'un sol pauvre. Selon Cropaia (2023), il est considéré comme moyen.

Le résultat de la capacité d'échange cationique CEC est de 9 205 (meq/100g) avec la méthode d'extraction à l'acétate d'ammonium (Tableau 10), soit 1 841 x 103 ppm.

Le résultat pour le Fe^{2+} est de 0,131 ppm (Tableau 10). Selon Urbano Terrón (1989), il s'agit d'un sol pauvre.

Le résultat pour Mn^{2+} est des traces en ppm (Tableau 10). Selon Urbano Terrón (1989), il s'agit d'un sol pauvre.

Le résultat pour Cu^{2+} est de 0,024 ppm (tableau 10) et pour Zn^{2+} est une trace de ppm (tableau 10), indicateurs de carence en micro-éléments.

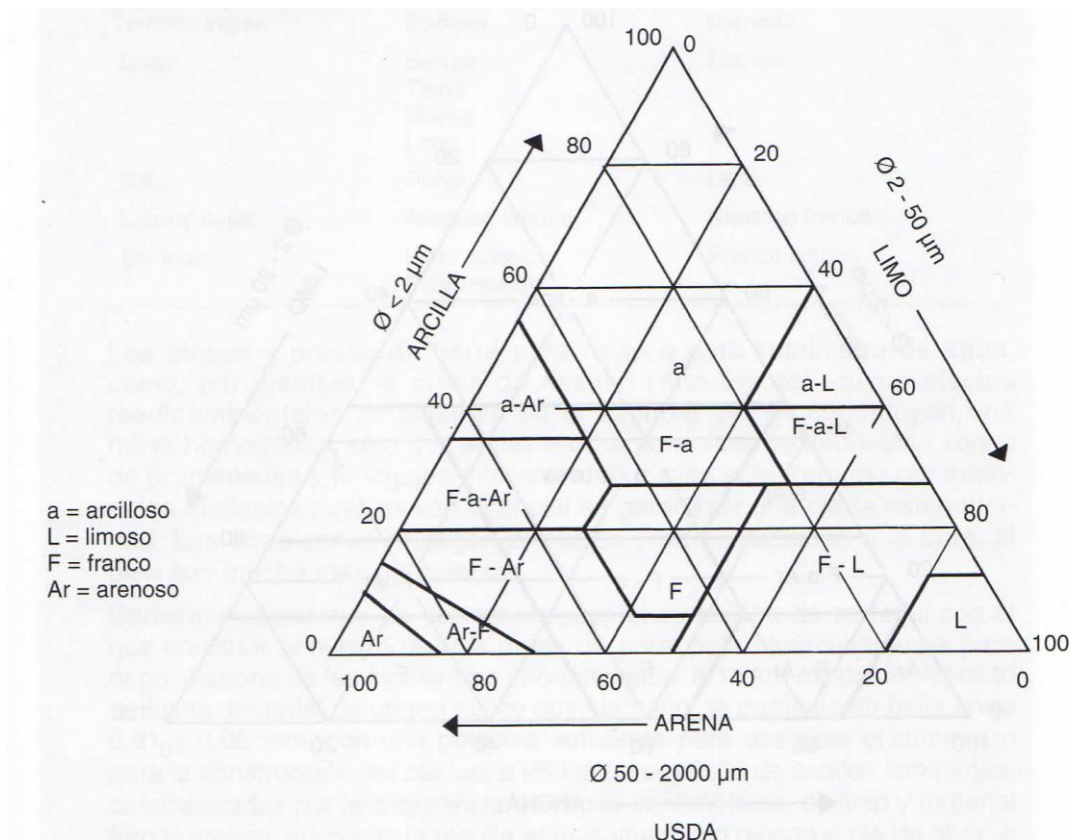


Figure 12 : triangle de texture de l'USDA (Porta, 2003).

Les résultats de la granulométrie sont les suivants :

% L = 12,5 limon
% A = 8,2 argile
% SG = 1,0 sable grossier
SM = 6,5 sable moyen
SF = 71,8 sable fin

On peut déduire de la texture qu'il s'agit d'un sol sablo-limoneux.

La prédominance de sable fin en fait un sol présentant un risque élevé d'érosion éolienne.

La faible présence de limon réduit le risque d'érosion élevée, la formation de croûtes en surface et la capacité de stockage des nutriments.

Enfin, la faible présence d'argile indique une faible fertilité chimique et une faible difficulté de travail du sol et de pénétration des racines (Porta, 2003).

Recommandations:

Pour l'élimination de la semelle et de la croûte superficielle, il est recommandé de réaliser un sous-solage avant le semis, à une profondeur de plus de 60 cm et si possible avec une sous-soleuse à trois bras attachée au système à trois points d'un tracteur d'environ 90 CV.

La correction du pH dans ce sol sableux peu complexe (argilo-humique) absorbant les cations calciques, peut être résolue par un apport modéré de calcium (amendement calcaire) (Fuentes, J.L., 1987).

Il est recommandé que le taux d'application exact de l'amendement calcaire soit effectué au moyen d'une remorque auto-basculante et d'un épandeur qui peut être attelé au système à trois points d'un tracteur de 90 ch et entraîné par sa prise de force.

Afin d'augmenter la quantité de C et de matière organique, il est recommandé d'incorporer les restes de la récolte en surface, si possible après un processus de compostage. S'il est également possible d'ajouter du fumier à la jachère, les résultats seront meilleurs.

Il est recommandé d'appliquer la dose exacte de compost ou de fumier à l'aide d'une remorque épandeuse de fumier attelée au timon d'un tracteur de 90 ch et entraînée par sa prise de force.

Pour l'incorporation de l'azote, il est conseillé de cultiver la parcelle et d'appliquer un engrais vert à base de légumineuses, qui permettent la fixation symbiotique de l'azote grâce à l'activité des bactéries du genre *Rhizobium* (Fuentes, J.L., 1987).

Il est recommandé de contrôler les doses d'irrigation pour éviter l'érosion hydraulique de l'azote et d'effectuer l'incorporation en profondeur de l'engrais sidéral au moyen d'une herse à double disque, d'une largeur permettant de la traîner et de l'accrocher au système à trois points d'un tracteur de 90 CV.

L'apport de résidus de culture ou l'introduction d'une culture d'engrais vert réduit le risque d'érosion éolienne en raison de la prédominance de sable fin.

Pour corriger le Na, qui est excessif, probablement en raison des doses élevées d'application d'engrais minéraux, il est recommandé de calculer les quantités d'engrais minéraux nécessaires et d'éviter de les appliquer manuellement, en recourant à l'application des doses exactes avec des épandeurs d'engrais attelés au système trois points d'un tracteur de 90 cv et entraînés par sa prise de force.

Il est possible que le changement de salinité de l'eau d'irrigation soit dû à la construction du barrage de Diama en 1986, qui a modifié le débit du fleuve Sénégal (Colejo Blanco, S. 2017).

En outre, la modification de la salinité de l'eau peut être due à la création en 2003 de la "Langue de Barbarie", une ouverture artificielle destinée à prévenir les inondations sur l'île de Saint-Louis (Oumar et Romagosa, 2013).

La possibilité d'une salinisation par intrusion marine est difficile à comprendre car les parcelles sont situées à environ 100 km de la côte, bien que l'altitude ne soit pas très élevée.

Si l'excès de Na est dû à une altération de la qualité de l'eau d'irrigation ou si celle-ci est appliquée sans tenir compte de la possibilité de drainage et de lessivage des sels, du moins en dehors de la zone de développement des racines, il est recommandé d'incorporer un filtre à osmose inverse à la sortie de la pompe d'irrigation. Parmi les techniques de dessalement, c'est celle qui permet de traiter le plus grand volume d'eau au moindre coût.

Sources d'information:

ASAE EP542 FEB1999 (R2013) Procedures for Using and Reporting Data Obtained with the Soil Cone Penetrometer.
American Society of Agricultural and Biological Engineers

ASAE S313.3 FEB1999ED (R2013) Soil Cone Penetrometer.
American Society of Agricultural and Biological Engineers

Cropaia, 2023. PAQUETE TÉCNICO. Para el agricultor y el agrónomo.
https://drive.google.com/file/d/1xn-dkplgvFUpye2SNZIHDpmGM5_WwAzx/view

Colejo Blanco, S. 2017. Cultivo de arroz en el valle del río Senegal. Análisis de ciclo de vida y propuestas de mejora. Trabajo Fin de Máster Universitario en Gestión de la Seguridad y Calidad Alimentaria. Universitat Politècnica de València.

Eijkelkamp, 2018. Manual de instrucciones. Penetrómetro de mano Eijkelkamp. Royal Eijkelkamp.
<https://www.royaleijkelkamp.com/products/field-measuring-equipment/resistance-to-penetration/mechanical/hand-penetrometer-eijkelkamp-1-m-or-3-m/>

Euronews, 2016. Senegal: de la agricultura tradicional a la intensiva. Euronews 8/05/2016.

<https://es.euronews.com/next/2016/05/18/senegal-de-la-agricultura-tradicional-a-la-intensiva>

Fuentes Yagüe, J.L. 1987. El suelo y los fertilizantes. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Hurtado, P., Morbidelli, E. de Dios Herrero, J., Colazo, J.C., 2021. ¿Qué expresan los resultados de un análisis de suelo? Información técnica 198. EEA INTA San Luis.

IMKO, 2017. Manual-Handheld-Device-HD21. IMKO Micromodultechnik GmbH
<https://www.imko.de/en/soil-moisture/>

Kumar, A.; Chen, Y.; Sadek, A.; Rahman, A. 2012. Soil cone index in relation to soil texture, moisture content, and bulk density for no-tillage and conventional tillage. Agricultural Engineering International: The CIGR e-journal 14(1):26-37

López Geta, J.A. y Mejías Moreno, M. 2023. Las aguas salobres. una alternativa al abastecimiento en regiones semiáridas. Instituto Geológico y Minero España.
<https://aguas.igme.es/igme/publica/pdfs/arttycon21.pdf>

Oumar, E. and Romagosa, F. (2013). El impacto del turismo en la Lengua de Barbarie (delta del río Senegal). Cuadernos de Turismo, 31:289-309.

Porta, J., López-Acevedo, M., Roquero, C. 2003. Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente. Madrid: Mundi-Prensa.

Santos, B. *et al.* 2017. ¿Cómo tomar muestras de suelo? Información técnica. Tenerife: Servicio Técnico de Agricultura y Desarrollo Local. Cabildo de Tenerife.

Schweizer Lassaga, S. 2011. Muestreo y análisis de suelos para diagnóstico de fertilidad. San José (Costa Rica): Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA).

Urbano Terrón, P., 1989. Tratado de Fitotecnia General. Madrid: Mundi-Prensa.