

INFLUENCE DU TAUX DE SODIUM ECHANGEABLE SUR LE COMPORTEMENT AU COMPACTAGE D'UN MELANGE DE SABLE ET DE BENTONITE

H. DERDOUR ⁽¹⁾

RESUME

L'étude de l'influence du taux de sodium échangeable sur le comportement au compactage a été réalisée sur un mélange de sable et de bentonite en proportions égales, préparé à différents taux de sodium échangeables (Nae/CEC).

Les résultats obtenus montrent les effets du rapport Nae/CEC sur les coordonnées du seuil hydrique de sensibilité au compactage (W_c , ρ_c) et celles du maximum de densité sèche (W_M et ρ_{max}), ainsi que sur le taux de croissance moyen de la densité sèche (Kcs).

INTRODUCTION

La sensibilité au compactage des sols agricoles est un facteur essentiel dans le choix des techniques culturales et du matériel d'intervention.

FAURE (1971, 1976, 1978) a mis en évidence l'existence de seuils hydriques de changement de comportement au compactage, fonction de la contrainte mécanique appliquée au matériau. L'un de ces seuils, appelé seuil de sensibilité au compactage, correspond à l'entrée en plasticité de l'argile qui dépend notamment de la nature minéralogique de l'argile.

En étudiant l'influence de la salinité sur le comportement au compactage des sols salés, les travaux de DERDOUR (1981) et HABCHAOUÏ (1981) ont montré l'existence probable d'une relation entre les variations des seuils hydriques des sols étudiés et celles du taux de sodium échangeable (Nae/CEC). L'objectif de ce travail est d'étudier l'influence du taux de sodium échangeable sur le comportement au compactage d'un matériau artificiel, constitué par le mélange, en proportions égales, d'une bentonite et d'un sable. Le matériau artificiel a été amené à différents niveaux de taux de sodium échangeable. La technique de compactage en laboratoire utilisée dans ce travail est le test Proctor. Le fait de travailler en laboratoire sur un matériau artificiel permet de s'affranchir de l'hétérogénéité des sols naturels et de contrôler le facteur étudié.

I. MATERIAUX ET METHODES

A) Le sable et la bentonite

Le matériau utilisé est constitué d'un mélange (50 % - 50 %) d'un sable grossier d'altération provenant de la région de Zemmouri (est d'Alger) et d'une bentonite à

(1) Département de Sciences du Sol J.N.A. El Harrach, Alger (Algérie).

dominante montmorillonitique prélevée dans un gisement situé dans la région de Mostaghanem (Oranie).

Les caractéristiques de ces deux matériaux composites sont regroupées dans le tableau I.

Tableau I : Caractéristiques du sable et de la bentonite
Properties of sand and bentonite

BENTONITE									
Composition minéralogique (%)			Granulométrie (%)			Autres caractéristiques			
Montmorillonite	50 à 55		Argiles	60		M.O. %	0,26		
Beidellite	10		Limons fins	22,5		CaCO ₃ %	0,22		
Hydromicas	10 à 15		Limons grossiers	10,8		CEC (meq/100g)	25		
Glauconie	5 à 10		Sables fins	0,58		pH (eau)	8,5		
			Sables grossiers	0,70					
SABLE									
Classe (mm)	0,04 - 0,05 - 0,15 - 0,20 - 0,63 - 0,80 - 1,60 - 2 et plus								
Pourcentage	0,7	0,65	3,4	32,8	18,6	20,7	19,55	10,25	

Le choix de ce sable où domine la fraction grossière (0,2 mm) se justifie par la nécessité d'assurer une bonne perméabilité aux mélagnes afin que leur percolation par les solutions salines soit continue pour éviter une trop grande concentration des matériaux en sels solubles. Ce sable a été lavé à l'eau pour éliminer les limons et les argiles. Il contient 2,3 % de CaCO₃ et 0,48 % de matière organique

B) Les caractéristiques physiques du mélange

Les caractéristiques physiques du mélange sont données dans le tableau II.

Tableau II : Caractéristiques physiques des mélanges
Physical properties of composed material

Arg.	Granulométrie (%)				Densité de solide	M.O. %	CaCO ₃ %
	L.F.	L.G.	S.F.	S.G.			
32,8	10,2	6,0	1,9	49,0	2,71	0,37	1,26

C) Enrichissement en sodium échangeable : description du protocole

Les difficultés rencontrées dans l'élimination des sels solubles et l'obtention d'un mélange satisfaisant dans le cas des sols naturels (DERDOUR, 1981) nous ont amené à modifier notre technique d'enrichissement. Cette nouvelle technique tient compte de l'équilibre ionique entre le complexe absorbant et la solution saline de percolation.

Les solutions salines utilisées sont des mélanges de chlorure de sodium et de calcium de normalité 0,5. Les solutions sont préparées par dissolution dans de l'eau

distillée, de quantités de NaCl et CaCl₂ déterminées en fonction des (S.A.R.)*, choisis parmi ceux les plus souvent rencontrés dans les sols salés et/ou sodiques. Les concentrations et quantités de solutions utilisées pour obtenir les teneurs de sodium échangeables escomptées sont reportées dans le tableau III.

Tableau III : Composition des solutions salines
Salt composition of solutions

Matériaux	Quantité de NaCl 0,5N dans 1 litre d'eau distillée (en ml)	Quantité de CaCl ₂ (en ml)	Concentration en meq/l		S.A.R. de solutions
			Na ⁺	Ca ⁺	
BS ₁	100	900	50	450	3,33
BS ₂	400	600	200	300	16,33
BS ₃	600	400	300	200	30,00
BS ₄	700	300	350	150	40,41

La préparation d'une quantité suffisante de matériau pour le compactage a nécessité l'utilisation de 8 colonnes de plexiglass (hauteur : 80 cm, diamètre : 8 cm), et cela pour chaque niveau de salinité.

1500 g de mélange sont introduites dans chaque colonne en veillant à ce que la densité sèche du matériau ne varie pas d'une colonne à l'autre, par vérification de la hauteur.

Les matériaux sont alors pécolés par la solution correspondant au niveau de salinité souhaité à raison de 3 litres de solution par colonne, répartis en 3 fois. La charge hydraulique est maintenue suffisamment grande pour permettre une infiltration continue et régulière de la solution saline. Le temps écoulé entre deux percolations successives (1 litre de solution par percolation) est fonction de la vitesse d'infiltration. Il varie entre 2 jours pour la première et la deuxième percolation, et environ une semaine pour la dernière percolation. Cette durée de contact entre la solution saline et le matériau est considérée comme suffisante pour assurer un équilibre entre les cations de la solution et ceux du complexe absorbant. Après épuisement de toute la quantité de la solution de percolation, les matériaux ont été lavés par 1 litre d'alcool éthylique afin d'éliminer ou de diminuer les excès de sels solubles. Le traitement d'enrichissement terminé, les matériaux issus des 8 colonnes correspondant à un même niveau d'enrichissement en sodium échangeable sont mélangés, séchés à l'air libre et enfin tamisés à 2 mm.

D) Les caractéristiques chimiques des mélanges enrichis en sodium

Sur chacune des huit colonnes correspondant à un même enrichissement en sodium échangeable, nous avons fait deux prélèvements de quelques grammes de matériau, l'un à l'extrémité inférieure, l'autre à l'extrémité supérieure de la colonne. Toutes les analyses chimiques, pour un traitement donné, ont été faites à partir du

$$* \text{ S.A.R. : Sodium adsorption ratio} = \frac{\text{Na}^+}{\frac{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++}}{2}}$$

mélange des 16 prélèvements ainsi effectués. En procédant ainsi, nous n'avons pas pris en compte les variations des caractères chimiques le long d'une même colonne. Les analyses effectuées ont concerné les bases échangeables, les sels solubles, le pH, la CEC et la conductivité électrique [CE].

Le déplacement des bases échangeables a été réalisé par l'acétate de sodium et l'extraction des sels solubles à partir de la pâte saturée. Les dosages ont été faits soit à l'absorption atomique, soit par titrimétrie.

Les résultats des analyses sont regroupés dans le tableau IV.

Tableau IV : Caractéristiques chimiques des mélanges enrichis
Chemical properties of artificial material

Matériaux	sels solubles (meq/l)				Bases échangeables (meq/100g)				CEC (meq/100g)	eE (mmohs/cm)	S.A.R
	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺			
Témoin											
BS ₁	3,04	0,87	10,40	4,80	1,35	1,50	22,50	0,20	25	1,50	1,10
BS ₂	0,84	0,09	7,20	5,36	5,55	1,70	16,30	0,20		2,78	3,55
BS ₃	8,94	0,16	11,20	4,70	12,19	1,80	10,20	0,20		3,11	3,18
BS ₄	29,20	0,12	1,40	5,32	13,60	2,12	8,20	0,2		4,20	10,70

E) Le compactage des mélanges enrichis en sodium

Après séchage et tamisage, les mélanges ont été amenés à différentes teneurs en eau choisies ; on utilise de l'eau distillée pour l'humectation des échantillons. Ainsi préparés, les échantillons ont été par la suite compactés en trois couches successives selon le procédé Proctor.

Le test Proctor, que nous avons utilisé en raison de sa simplicité, est une méthode de compactage dynamique, qui met en jeu une énergie cinétique créée par la chute d'une dame de compactage de masse m, tombant d'une hauteur h, un nombre n de fois, développant ainsi une énergie de compactage de 590 kJ/m³ (*), le moule que nous avons utilisé ayant un volume V = 300 cm³. Pour garder la même énergie de compactage que dans le procédé standard (590 kJ/m³), les valeurs des trois paramètres indépendants, m, h, n, ont été choisies respectivement égales à 1 kg, 0,20 m et 30 coups (FAURE, 1978).

II. RESULTATS

Les résultats des essais de compactage (tableau V et figure 1) donnent les variations de la densité sèche des matériaux compactés en fonction de la teneur en eau au moment du compactage.

(*) L'énergie standard de compactage est calculée d'après la formule suivante :

$$E \text{ (kJ/m}^3\text{)} = \frac{m \cdot g \cdot h \cdot n \cdot N}{V}, \text{ dans laquelle :}$$

N = nombre de couches

g = accélération de la pesanteur (m/s²)

EFFETS DE SODIUM ECHANGEABLES SUR LE COMPACTAGE

Tableau V : Variation de la densité sèche ρ_d en fonction de la teneur en eau
Relationship between bulk density and the water content

BS ₁	W%	6,2	7,1	8,1	10,2	12,3	12,2	15,8	16,3	18,6	19,4	21,5	23,4	24,4	26,4	27,9
	ρ_d	1,43	1,41	1,44	1,51	1,56	1,55	1,61	1,65	1,71	1,70	1,65	1,61	1,56	1,51	1,43
BS ₂	W%	4,8	5,5	6,2	7,4	9,2	11,4	12,5	13,1	14,7	15,4	17,8	16,6	20,7	22,6	24,9
	ρ_d	1,44	1,47	1,52	1,54	1,61	1,61	1,63	1,64	1,64	1,71	1,71	1,70	1,65	1,60	1,54
BS ₃	W%	6,0	7,3	9,1	10,1	12,0	13,1	15,1	16,3	18,4	21,7	22,9	25,9	28,9	28,9	
	ρ_d	1,45	1,49	1,51	1,49	1,54	1,57	1,65	1,73	1,69	1,69	1,67	1,62	1,52	1,48	
BS ₄	W%	6,4	7,3	9,3	10,6	12,9	13,9	15,7	17,5	19,9	22,0	22,8	24,8	25,5	28,0	
	ρ_d	1,48	1,52	1,52	1,52	1,61	1,57	1,71	1,71	1,67	1,62	1,59	1,56	1,54	1,46	
TEMOIN	W%	6,1	7,2	9,9	12,1	13,5	14,7	15,8	18,4	18,7	21,1	22,6	24,7	25,5	28,5	
	ρ_d	1,54	1,49	1,52	1,53	1,56	1,60	1,64	1,66	1,66	1,65	1,60	1,54	1,55	1,47	

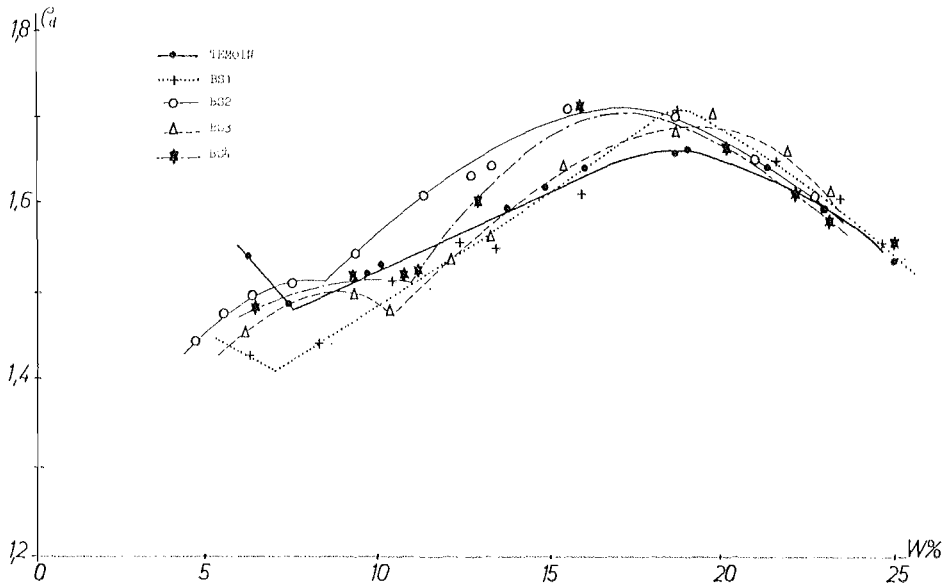


Fig. 1 : Variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau (W %).
 Courbes Proctor.

*Relationship between the bulk density and the water content (W %).
 Proctor's curves.*

Dans notre analyse de l'influence du sodium échangeable sur le comportement au compactage des matériaux étudiés, nous nous référerons aux caractéristiques suivantes des courbes de compacité :

— les coordonnées du maximum de compacité (W_c, ρ_{dc}^{max}) et du seuil hydrique de sensibilité au compactage (W_c, ρ_{dc}).

— le coefficient : $K_{sc} = \frac{\rho_{dc}^{max} - \rho_{dc}}{W_c - W_M}$, qui exprime le taux de croissance

moyen de la compacité entre le seuil de sensibilité au compactage et le maximum de compacité. Ce coefficient renseigne sur la rapidité avec laquelle un matériau donné atteint son maximum de densité sèche une fois que l'argile qu'il contient atteint son seuil hydrique d'entrée en plasticité (DERDOUR, 1981).
 Association Française pour l'Etude du Sol - www.afes.fr - 2010

Les caractéristiques mécaniques des mélanges compactés sont regroupées dans le tableau VI.

Tableau VI : Caractéristiques mécaniques des mélanges compactés
Mechanical properties of compacted materials

Caractéristiques	Témoin	BS1	BS2	BS3	BS4
e_d^c	1,49	1,41	1,52	1,49	1,52
w_c %	7,15	7,0	8,0	10,0	10,8
e_d^{max}	1,67	1,71	1,72	1,70	1,72
w_M %	19,00	18,0	16,9	19,0	16,7
Ksc %	1,51	2,55	2,60	2,70	3,20
N_{ae}/CEC %		5,4	26,2	48,8	54,4

Il apparaît en premier lieu que le taux de sodium échangeable n'a pas d'influence sur le maximum de densité atteint avec la technique Proctor. On observe toutefois, sans que l'on puisse l'expliquer, que la densité sèche maximum du matériau témoin n'ayant pas subi le protocole d'enrichissement en sodium est plus faible que celle des quatre mélanges enrichis (1,67 au lieu de 1,71).

La teneur en eau au maximum de densité varie légèrement entre les divers matériaux (au plus de 2 % en eau). Cette variation n'est probablement pas ou peu significative compte tenu de la faible précision de la détermination graphique de w_M .

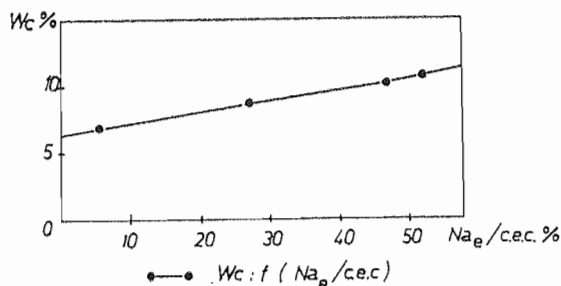


Fig. 2 : Variation du seuil de sensibilité au compactage (w_c) en fonction du taux de sodium échangeable (N_{ae})
CEC

Relationship between the threshold of sensibility on compaction and the exchangeable sodium percentage (N_{ae}/CEC)

Les résultats obtenus (tableau VI, figure 2) montrent par contre une influence nette du taux de sodium échangeable sur la variation du seuil hydrique de sensibilité au compactage (w_c). Cette influence est traduite par une relation de corrélation simple d'équation :

$$w_c = 0,76 [N_{ae}]/CEC + 6,44 \text{ avec } r = 0,99 \text{ [hautement significatif].}$$

La densité sèche au seuil de sensibilité au compactage varie également de 1,40 à 1,50, selon les matériaux. C'est surtout BS 1 qui se distingue des autres matériaux.

Enfin, l'enrichissement en sodium du mélange ne se traduit pas par une variation importante du coefficient Ksc c'est-à-dire de la croissance de la densité sèche entre les deux points singuliers des courbes Proctor.

III. DISCUSSION

Les résultats obtenus montrent l'influence du sodium échangeable sur le comportement au compactage du matériau étudié.

Nous pensons que l'augmentation de la teneur en eau au seuil de sensibilité au compactage est due soit à l'accroissement du gonflement de l'argile de plus en plus sodique (BS 3 et BS 4), soit au volume d'eau supplémentaire nécessaire pour remplir les vides créés par la floculation de l'argile aux faibles taux de sodium échangeables (BS 1 et BS 2).

D'autre part, les variations du rapport $\frac{Wc}{A}$ (rapport de la teneur en eau au seuil de sensibilité au compactage à la teneur en argile) de 0,21 pour BS 1 à 0,32 pour BS 4 montrent que le sodium échangeable modifie nettement le comportement mécanique de l'argile. Notons que FAURE (1978) a trouvé pour $\frac{Wc}{A}$ les valeurs de 0,32 et 0,38 pour respectivement une kaolinite calcique et une montmorillonite calcique.

CONCLUSION

En conclusion, il ressort des résultats obtenus que l'enrichissement en sodium du mélange, notamment en sodium échangeable, modifie le comportement au compactage du matériau étudié.

Cette influence se manifeste particulièrement sur le seuil hydrique de sensibilité au compactage, autrement dit sur la limite de plasticité du matériau, comme en témoigne la bonne corrélation obtenue entre Wc et Nae/CEC .

Par contre, le taux de sodium échangeable n'a pratiquement pas d'effet sur le maximum de compacité et sur le coefficient d'accroissement moyen de la compacité Ksc.

Reçu pour publication : juin 1984

Accepté pour publication : mai 1985

INFLUENCE OF EXCHANGEABLE SODIUM PERCENTAGE ON THE MECHANICAL PROPERTIES (COMPACTION) OF AN ARTIFICIAL MATERIAL (SAND AND BENTONITE)

The study of the influence of the exchangeable sodium percentage is carried out on a mixture of bentonite and sand in equal proportions, prepared with different exchangeable sodium percentage (Nae/CEC) (Tab. I, II, III, IV).

Results show the influence of Nae/CEC on the maximal bulk density, compaction sensibility threshold (Wc) and mean increase coefficient of bulk density (Ksc). (Tab. V, VI and fig. 1, 2).

BIBLIOGRAPHIE

- DERDOUR H., 1981. — Contribution à l'étude de l'influence du taux de sodium échangeable sur le comportement des sols au compactage. Thèse Magister INA, Alger, 50 p.
- FAURE A., 1971. — Contribution à l'étude du mécanisme de compactage des sols : notions de potentiel de lubrification. Ann. Agron. 22 (5), 478-513 .
- FAURE A., 1976. — Influence de phase argileuse sur la susceptibilité au tassement des sols. Bull. de l'A.F.E.S. (2), 121-130.
- FAURE A., 1978. — Comportement des sols au compactage. Rôle et conséquence de l'argile sur l'arrangement des grains. Thèse de Doct. ès science. Univ. scientifique et médicale de Grenoble. 137 p.
- HABCHAOUI A., 1981. — Sensibilité au compactage des sols salés de Relizane. Mémoire d'ingénieur agronome I.N.A., Alger, 52 p.