

Densification de sols fins compressibles par colonnes ballastées : étude expérimentale en laboratoire de l'influence du mode de mise en place

D. RANGEARD
V.T.P. PHAN
J. MARTINEZ

Université européenne
de Bretagne
Laboratoire GCGM
INSA de Rennes
20, avenue des Buttes
de Coësmes
CS 70839
F-35708 Rennes Cedex 7

Résumé

Cette étude s'intéresse à la consolidation des sols fins lors de la mise en place de colonnes ballastées. Plus précisément, on cherche à mettre en évidence le rôle du mode de mise en place de l'élément granulaire sur la densification du sol encaissant. L'étude est réalisée expérimentalement en laboratoire. La mise en place d'une colonne ballastée est dans ce cas simulée par la mise en place d'une colonne de sable au sein d'une éprouvette d'argile. Plusieurs colonnes de sables sont réalisées pour différents mode de mise en place (avec et sans refoulement) et pour différents efforts de compactage en cours de construction. L'influence de l'effort de compactage est analysé. Ensuite, on s'intéresse au comportement mécanique du sol renforcé. Pour ce faire, les éprouvettes renforcées (sol contenant une colonne mise en place suivant l'un ou l'autre mode) sont soumises à un même chargement uniforme. L'influence du diamètre de la colonne d'une part et du mode de mise en place d'autre part sur la réduction des tassements est ainsi analysée.

Mots-clés : renforcement, colonnes ballastées, méthode de construction, tassement.

Densification of fine soil by stone columns: experimental study in laboratory

Abstract

This paper presents the results of the study of a clayey soil (kaolin) reinforced by sand columns and obtained from an experimental procedure in the laboratory. More specifically, it highlights the influence of the construction method on the mechanical behavior of stone columns models. Sand columns were built by substitution and by repulsion. Several columns were formed using different compaction forces during their construction. The influence of the compaction force during the construction was analyzed. Finally, the reinforced soil specimens were submitted to a vertical loading in order to assess the influence of the compaction force on the hydro-mechanical behavior of the soil/column complex.

Key words: reinforcement, stone column, method of construction, settlement.

Introduction

La technique de renforcement par colonnes ballastées est de plus en plus utilisée pour les ouvrages fondés sur des sols fins. L'amélioration apportée par ce type de renforcement est de deux types : d'une part l'apport d'un matériau granulaire aux caractéristiques supérieures à celles du sol en place, d'autre part la densification du sol encaissant les colonnes due au mode de mise en place de ces dernières.

L'analyse du comportement de colonnes ballastées a fait l'objet de nombreuses études numériques. Ces études ont mis en évidence une zone d'influence de la colonne ballastée de l'ordre de grandeur du diamètre de la colonne (Khabbazian *et al.*, 2009 ; Ambily *et al.*, 2007). L'intérêt de la prise en compte de l'expansion latérale de la colonne lors de sa réalisation sur la modélisation du comportement du sol renforcé a également été reporté (Rangeard *et al.*, 2005 ; Guetif *et al.*, 2007 ; Nguyen *et al.*, 2008 ; Murugesan *et al.*, 2006 ; Deb *et al.*, 2007 ; Tan *et al.*, 2008 ; Rollins *et al.*, 2009).

Six (2006) a cherché à mettre en évidence l'influence de l'état initial du sol et du mode de mise en place des colonnes sur leur comportement mécanique. Plus précisément, une campagne *in situ* a été menée afin d'évaluer le rôle de l'effort de compactage. Des essais pressiométriques ont mis en évidence une augmentation significative du module pressiométrique avec l'effort de compactage.

Dans cette étude, on s'intéresse principalement à l'influence du mode de mise en place de la colonne sur le comportement du sol renforcé. Afin de s'affranchir de la variabilité naturelle des massifs de sol, on s'oriente vers une approche expérimentale sur modèles réduits de laboratoire. On travaille ainsi sur un sol reconstitué, présentant des caractéristiques bien définies et homogènes. La simulation du comportement de colonnes ballastées en laboratoire sur modèles réduits a déjà fait l'objet de nombreuses études. On peut citer à titre d'exemples les travaux de Black *et al.* (2006, 2007) où Sivakumar *et al.* (2004). Cependant, ces études s'intéressent principalement au rôle du diamètre et/ou de la longueur de la colonne sur l'efficacité du renforcement. Les colonnes de sable utilisées sont mises en place par forage d'une cavité au sein d'une éprouvette, puis comblement de la cavité par un matériau granulaire. Ce mode de mise en place correspond à une simple substitution du sol par un matériau granulaire et est très éloigné du mode de mise en place des colonnes ballastées. Dans le cadre de ce travail, on cherche à reproduire au mieux la procédure de mise en place *in situ* des colonnes ballastées et notamment de prendre en compte l'effet du compactage du matériau granulaire sur le sol environnant. Ainsi, des colonnes de sables sont créées à partir d'un appareillage permettant leur réalisation par substitution ou par refoulement du sol, puis compactage du matériau granulaire incorporé. Plusieurs colonnes sont alors réalisées par substitution et par refoulement et en faisant varier l'intensité du compactage utilisé pour leur mise en place. Le diamètre des colonnes créées par refoulement ainsi que la densification du sol autour de la colonne sont caractérisés par découpage *a posteriori* du massif de sol. L'effort de compactage utilisé pour la réalisation des colonnes sur ces paramètres est mis en évidence.

État initial du matériau

Le matériau utilisé pour créer les éprouvettes de sol est un kaolin industriel, provenant des carrières de Ploemeur (Morbihan) (Polwhite BB). Ce matériau présente l'avantage d'avoir déjà été utilisé au laboratoire et d'être particulièrement bien identifié en termes de caractéristiques mécaniques. Les valeurs de la limite de liquidité w_l et de plasticité w_p du matériau déterminées suivant les normes françaises (NF P94-051) sont respectivement de 55 % et 47 %.

Le matériau utilisé pour modéliser le ballast est un sable de Loire lavé et tamisé. Compte tenu des dimensions réduites du modèle, on utilise uniquement la fraction granulaire 1 mm à 1,25 mm.

Les éprouvettes sont mises en place par consolidation du matériau préalablement humidifié à une teneur en eau de l'ordre du double de sa limite de liquidité. Le matériau ainsi humidifié est conservé pendant 24 h sous sac étanche afin d'obtenir une humidification homogène. Au terme de cette étape, le matériau est versé dans les moules rigides de 15 cm de diamètre, puis soumis à des chargements croissants jusqu'à atteindre une contrainte de 50 kPa. Cette contrainte est maintenue jusqu'à stabilisation du tassement. L'état ainsi atteint est appelé par la suite « état initial ». Il constitue l'état de référence sous lequel chacune des éprouvettes est conditionnée avant la mise en place des colonnes de sable. Les caractéristiques physiques et géométriques des éprouvettes sous leur état initial sont données dans le tableau I. La hauteur moyenne des éprouvettes sous cet état de référence est d'environ 12 cm. L'indice des vides initial est très proche entre les différentes éprouvettes (moyenne de 1,52, écart type de 0,02). La méthode de mise en place est donc reproductible et permet d'avoir un état initial de référence identique ou très proche pour l'ensemble des éprouvettes.

Avec :

- h_0 : hauteur de l'éprouvette ;
- w_0 : teneur en eau ;
- γ_{h0} : poids volumique humide ;
- γ_{d0} : poids volumique sec ;
- e_0 : indice des vides ;
- Φ_0 : diamètre du mini-carottier utilisé ;
- F_{com} : effort de compactage utilisé.

Les caractéristiques géotechniques du « sol » ainsi constitué sont déterminées à partir d'essais classiques de laboratoire (œdomètres, essais triaxiaux). Les principales caractéristiques sont données dans le tableau II. Plus de détails peuvent être trouvés dans Phan (2010).

La perméabilité du matériau est mesurée pour différentes valeurs de l'indice des vides. Les résultats obtenus, présentés figure 1, montrent que l'évolution

TABEAU I Caractéristiques initiales des éprouvettes.

Mode de mise en place	Caractéristiques à l'état initial (sous 50 kPa) (avant mise en place des colonnes)						Colonnes mises en place	
	N° moule	h_0 (mm)	w_0 (%)	γ_{h0} (kN/m ³)	γ_{q0} (kN/m ³)	e_0	Φ_0 (mm)	F_{com} (N)
NR-NC	I-1	127,0	57,8	16,5	10,4	1,56	sans	–
	II-1	125,4	56,5	16,4	10,5	1,53	11,9	3
	III-1	125,3	56,5	16,6	10,5	1,53	13,8	3
	IV-1	124,0	54,5	16,6	10,7	1,47	15,8	3
	V-1	124,8	55,6	16,6	10,6	1,50	25,1	3
NR-WC	I-2	129,1	57,0	16,7	10,6	1,54	20,1	23
	II-2	128,7	56,6	16,5	10,5	1,53	20,1	54
	III-2	127,6	57,1	16,6	10,6	1,54	20,1	74
	IV-2	128,6	55,8	16,6	10,6	1,51	20,1	104
	V-2	130,0	57,1	16,5	10,5	1,54	20,1	124
WR-WC	I-3	130,9	56,6	16,2	10,3	1,53	9,7	54
	II-3	130,5	57,2	16,3	10,4	1,55	9,7	74
	III-3	128,9	56,1	16,5	10,5	1,52	9,7	104
	IV-3	130,0	56,1	16,3	10,5	1,51	9,7	124
	Moyenne	127,9	56,4	16,5	10,5	1,52	–	–
	Écart-type	2,19	0,85	0,15	0,10	0,02	–	–

TABEAU II Caractéristiques géotechniques du matériau.

C_c	C_s	σ'_p (kPa)	c' (kPa)	φ' (°)
0,52	0,10	50	0	21°

de la perméabilité avec l'indice des vides suit une loi logarithmique, comme proposé par Taylor (1948). Pour le kaolin utilisé la relation entre e et k s'exprime suivant l'expression (1) ci-dessous :

$$e = 0,77 \log k + 7,8 \quad (1)$$

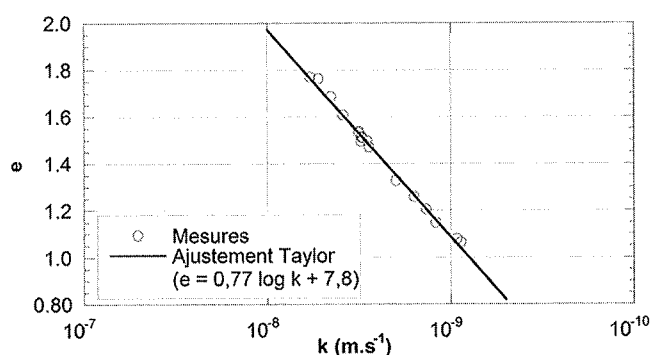


FIG. 1 Évolution de la perméabilité avec l'indice des vides.

3

Simulation de la mise en place de colonnes de sable

La mise en place d'une colonne de sable au sein des éprouvettes préalablement consolidées sous l'état initial de référence est réalisée suivant deux procédures

principales. La première vise à reproduire une mise en place par substitution du sol, avec ou sans compactage du matériau granulaire incorporé. La seconde cherche à reproduire au mieux la mise en place *in situ* des colonnes ballastées, c'est-à-dire par refoulement puis compactage du sable constitutif de la colonne.

3.1

Mise en place par substitution

Le premier mode de mise en place correspond à une substitution du sol par un matériau granulaire. Toutefois, deux conditions de mise en place sont différenciées : une mise en place par substitution sans compactage du matériau granulaire incorporé (mode de mise en place noté NR-NC) et une mise en place par substitution avec compactage du matériau granulaire incorporé (NR-WC).

La création d'une colonne de sable consiste à fonder un mini-carottier de diamètre f_0 sur toute la hauteur de l'éprouvette de sol (Fig. 2a). Le mini-carottier est guidé par un système rigide fixé sur le moule de l'éprouvette. Ensuite, une mini-tarière d'un diamètre correspondant au diamètre intérieur du carottier est utilisée pour retirer l'argile contenue dans le carottier (Fig. 2b). La colonne est ensuite réalisée couche par couche de la manière suivante :

- une quantité de sable correspond à une hauteur de 2 cm est introduite dans le carottier (Fig. 2c) ;
- le carottier est relevé d'une hauteur correspond à la hauteur de sable introduite (Fig. 2d) ;
- un piston de diamètre égal à celui du carottier est descendu sur la surface du sable (Fig. 2e) ;
- un effort de compactage F est appliqué (Fig. 2f).

Ces différentes phases sont renouvelées jusqu'à obtenir une colonne de sable sur toute la hauteur de

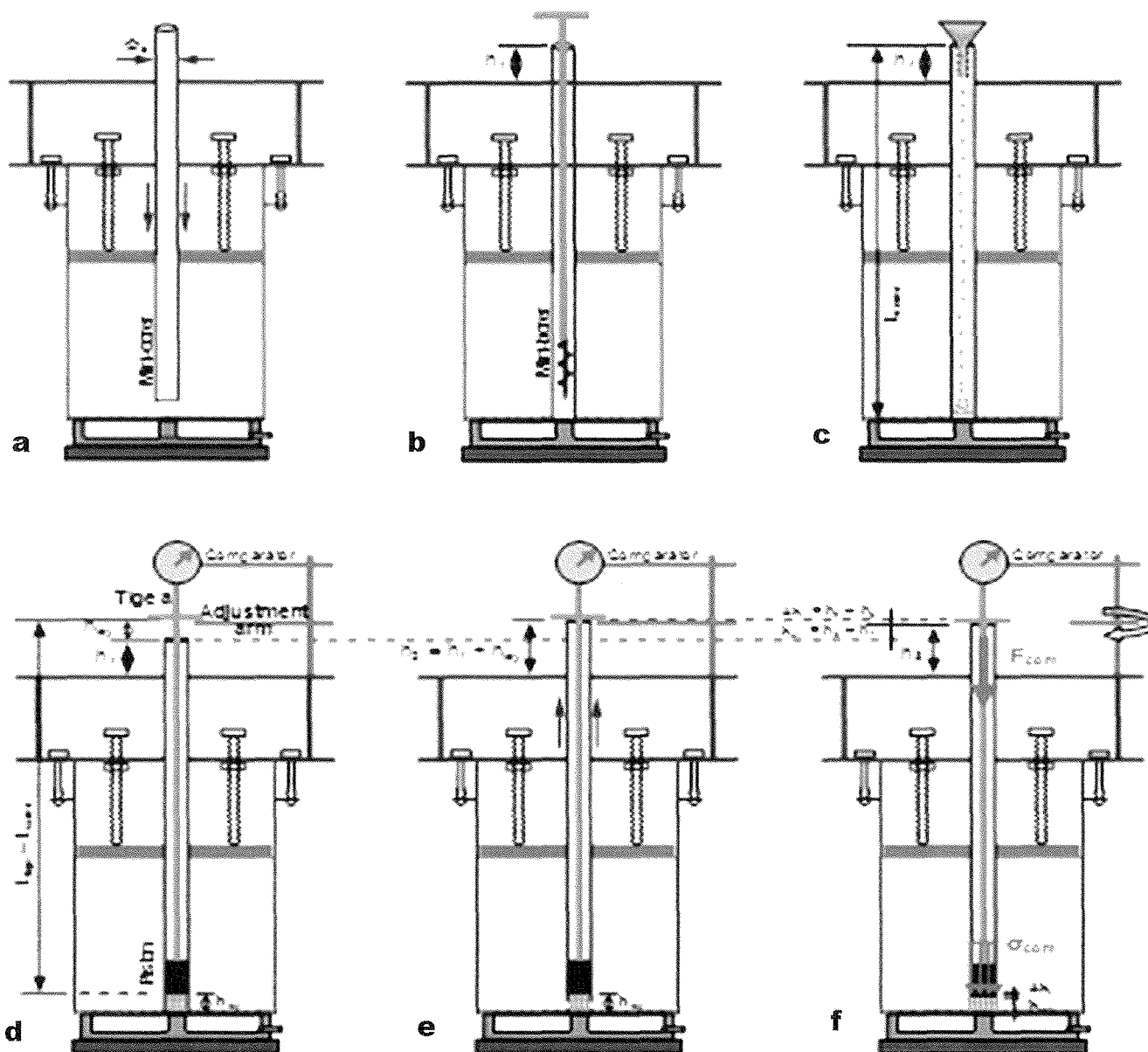


FIG. 2 Mise en place des colonnes de sable. Mise en place sans refoulement (mode NR-NC et NR-WC).

l'éprouvette d'argile. Ensuite, une couche de sable de 15 mm est mise en place en surface de l'éprouvette de kaolin. La colonne de sable est ensuite saturée en eau afin de maintenir une saturation optimale du kaolin.

Pour le mode de mise en place sans compactage, des carottiers de diamètres compris entre 12 mm et 25 mm sont utilisés. Malgré le terme « sans compactage », un effort F de 3 N, correspondant au poids du piston est appliqué. Suivant les dimensions des carottiers utilisés, cet effort correspond à une contrainte comprise entre 6 kPa et 28 kPa. Les colonnes créées avec ce mode de mise en place NR-NC sont mises en place dans les éprouvettes de la première série (notées I-1 à V-1) dans le tableau I.

Pour le mode de mise en place avec compactage, un carottier unique de 20 mm de diamètre est utilisé. L'effort de compactage utilisé à l'étape 2f varie entre 23 N et 123 N, ce qui correspond à des contraintes de compactage comprises entre 70 kPa et 390 kPa. Les éprouvettes concernées sont celles de la seconde série, notées I-2 à V-2 dans le tableau I.

3.2

Mise en place par refoulement

Pour ce mode de mise en place (WR-WC), un mini-carottier de diamètre 10 mm est utilisé. La dimension réduite du forage permet d'augmenter la contrainte de compactage appliquée sur le matériau granulaire. Pour la réalisation des colonnes de sable suivant cette procédure, le mini-carottier est tout d'abord foncé, l'extrémité obturée par une pointe conique, jusqu'en fond de moule (Fig. 3a). Ensuite, la pointe est retirée, et la colonne est réalisée de la même manière que pour les méthodes précédentes. Les efforts appliqués pour la création des colonnes avec cette procédure varient de 33 N à 84 N et correspondent à des contraintes de compactage de 445 kPa à 1 150 kPa. A titre de comparaison, une mise en place *in situ* avec une poussée statique de 20 tonnes correspond à une contrainte moyenne appliquée de l'ordre de 1 800 kPa (Dhouib et Blondeau, 2005). Les éprouvettes concernées par ce mode de mise en place sont celles de la troisième série, notées I-3 à IV-3 dans le tableau I.

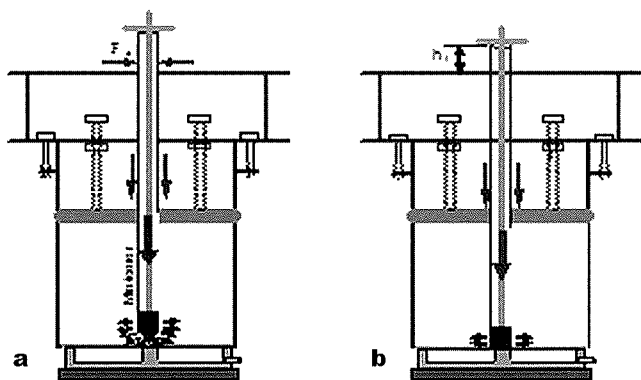


FIG. 3 Mise en place d'une colonne de sable avec refolement et compactage (mode WR-WC) : a) fonçage du mini-carottier-extrémité obturée ; b) compactage.

3.3

Comparaison des méthodes de mise en place

Lors de la mise en place des colonnes de sable, le tassement d'une couche sous l'effet de l'effort de compactage est mesuré. Le tassement moyen des couches de sable est alors déterminé, et permet de calculer la déformation verticale moyenne des couches de sable. Cette déformation, notée ε_{ave} , est donnée dans le tableau III et présentée (Fig. 4) en fonction de l'effort de compactage utilisé pour les trois modes de mise en place testé. Il apparaît sur cette figure que la déformation axiale augmente logiquement avec l'effort appliqué, et qu'elle semble relativement indépendante du mode de mise en place.

A partir du tassement des couches de sable et du volume de sable introduit, le diamètre de la colonne formée est estimé. Ce diamètre noté Φ_{cal} et l'augmentation relative du diamètre par rapport au diamètre du carottier $\Delta\Phi_{\text{cal}}/\Phi_0$ sont également donnés dans le tableau III. Le taux de substitution, défini par l'expression (2) ci-dessous, est également donné.

$$a = \frac{A_c}{A} \quad (2)$$

TABLEAU III Déformation axiale et diamétrale des colonnes de sable.

Method	N° moule	Φ_0 (mm)	σ_{comp} (kPa)	ε_{ave} (%)	Φ_{cal} (mm)	$\frac{\Delta\Phi_{\text{cal}}}{\Phi_0}$ (%)	a_0 (%)	a_{cal} (%)	$\frac{\Delta a_{\text{cal}}}{a_0}$ (%)
NR-NC	I-1	11,9	28	30	14,2	20	0,6	0,9	43
	II-1	13,8	21	28	16,1	17	0,8	1,1	37
	III-1	15,8	16	25	17,4	11	1,1	1,4	22
	IV-1	20,1	10	15	21,8	8	1,8	2,1	17
	V-1	25,1	6	22	28,5	13	2,8	3,6	28,4
NR-WC	I-2	20,1	73	8	21,6	7	1,5	2,1	16
	II-2	20,1	168	40	26,5	32	1,5	3,1	74
	III-2	20,1	230	59	31,8	58	1,5	4,5	150
	IV-2	20,1	325	67	35,1	75	1,5	5,5	206
	V-2	20,1	388	68	35,6	77	1,5	5,6	214
WR-WC	I-3	9,7	446	72	18,7	93	0,4	1,5	274
	II-3	9,7	570	78	20,5	111	0,4	1,9	350
	III-3	9,7	718	85	24,1	148	0,4	2,6	522
	IV-3	9,7	1 141	91	31,5	225	0,4	4,4	964

Avec :

A_c surface de la colonne après réalisation ;

A surface unitaire pour une colonne (il s'agit ici de la surface du moule).

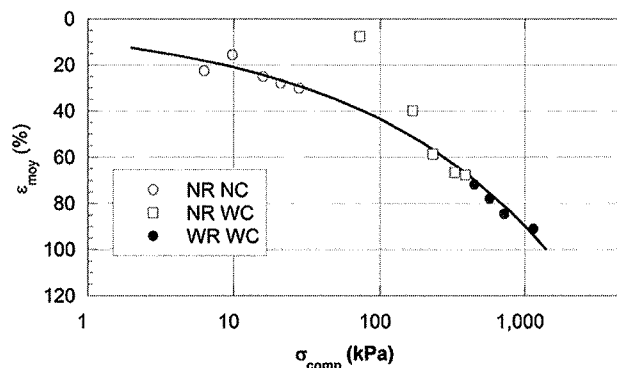


FIG. 4 Déformation verticale moyennes des colonnes de sables avec l'effort de compactage.

La méthode simple utilisée ici pour calculer le diamètre de la colonne de sable (à partir du tassement de la couche de sable et du volume de sable introduit) suppose que le volume de sable reste constant sous l'effet du compactage. On peut donc supposer que plus la contrainte de compactage appliquée est élevée, plus la méthode surestimera le diamètre de la colonne.

Pour valider cette méthode d'estimation du diamètre, après réalisation de la colonne de sable, certaines éprouvettes ont été découpées afin de mesurer directement le diamètre de la colonne. Pour cette vérification, des éprouvettes contenant une colonne mise en place avec refolement et compactage (WR-WC) ont été testées. Il s'agit en effet du mode de mise en place pour lequel les plus fortes valeurs de contraintes de compactage ont été utilisées. Les valeurs de la contrainte de compactage σ_{comp} , du diamètre moyen mesuré après découpage (Φ_{dec}) et du diamètre moyen calculé à partir de la quantité de sable introduite (Φ_{cal}) sont données dans le tableau II. On remarque que les valeurs du diamètre calculées surestiment légèrement les valeurs réelles mesurées (sauf pour un cas). Toutefois, l'écart entre les deux méthodes reste faible.

TABEAU IV Comparaison des diamètres des colonnes estimés et mesurés.

σ_{comp} (kPa)	446	570	718	1 141
ϕ_{cal} (mm)	18,7	20,5	24,1	31,5
ϕ_{dec} (mm)	18,2	19,9	24,0	31,6
Δ/ϕ_{cal} (%)	2,6	2,9	0,4	-0,3

Les diamètres des colonnes de sable ainsi évalués donnés dans le tableau III montrent que pour la méthode par substitution sans compactage (NR-NC), en raison du très faible effort de compactage appliqué, le diamètre des colonnes obtenu est très proche du diamètre du carottier utilisé. Des colonnes de diamètres compris entre 12 mm et 25 mm sont ainsi réalisées. Pour la méthode par substitution et compactage (NR-WC), le carottier utilisé est de 20 mm. Suivant l'effort de compactage utilisé, les diamètres des colonnes obtenues varient entre 21,6 mm et 35,6 mm. Enfin, pour la procédure de mise en place avec refoulement puis compactage (WR-WC), les diamètres des colonnes réalisées varient entre 18,7 mm et 31,5 mm pour un diamètre de carottier initial de 10 mm.

L'évolution de la déformation diamétrale des colonnes de sable en fonction de l'effort de compactage pour les différents modes de mise en place est présentée sur la figure 5. On observe sur cette figure que les déformations produites sont croissantes avec les contraintes de compactage appliquées aux colonnes de sable, et surtout que celles-ci semblent relativement indépendantes du mode de mise en place des colonnes de sable.

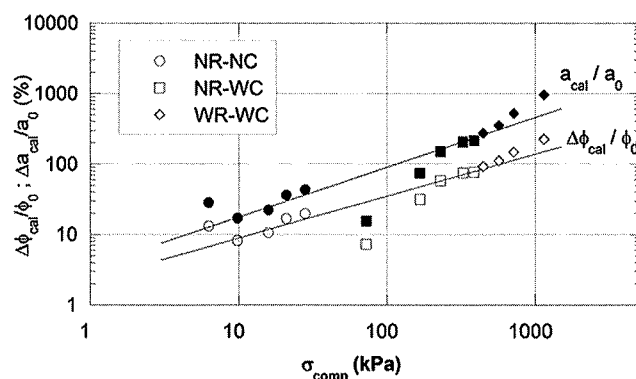


FIG. 5 Déformation diamétrale des colonnes des sables avec l'effort de compactage.

3.4

Densification du kaolin produite par la mise en place des colonnes de sable

Trois éprouvettes contenant des colonnes mises en place avec refoulement et compactage (contrainte de compactage de 446 kPa, 718 kPa et 1 140 kPa) ont été découpées afin d'évaluer la densification produite au cours de la mise en place de la colonne de sable. L'évolution de l'indice des vides est présentée en fonction du rapport r/r_{dec} (r , position radiale par rapport au centre de la colonne, et r_{dec} , rayon de la colonne de sable) sur la figure 6. On observe une forte diminution de l'indice des vides à proximité de la colonne. La densification du matériau encaissant la colonne est observée sur une couronne d'épaisseur de l'ordre de grandeur du rayon de la colonne de sable.

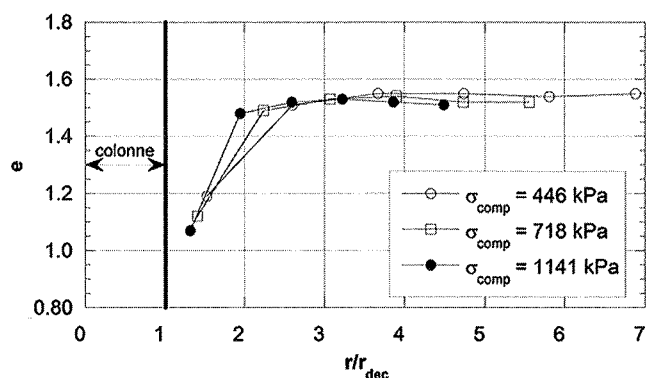


FIG. 6 Variation de l'indice des vides en fonction du rayon.

4

Comportement des éprouvettes renforcées

Pour évaluer l'influence du renforcement sur le comportement d'une éprouvette d'argile, on soumet celle-ci, après réalisation de la colonne de sable, à un chargement uniforme de 150 kPa. Ce chargement est maintenu suffisamment longtemps pour que la consolidation primaire soit achevée. Les courbes d'évolution du tassement ainsi obtenues sont présentées en figures 6, 7 et 8 respectivement pour les modes de mise en place NR-NC, NR-AC et WR-WC. Sur ces figures est également placée la courbe d'évolution du tassement d'une éprouvette de kaolin sans colonne de sable. Cette courbe constitue une courbe de référence correspondant au sol vierge de tout traitement.

Pour le mode de mise en place sans refoulement, sans compactage (NR-NC), on note une réduction du tassement pour les éprouvettes contenant une colonne de sable (Fig. 7). Cette réduction est d'autant plus importante que le diamètre de la colonne mise en place est important. Pour le diamètre maximal on observe une réduction du tassement de 13 % par rapport au sol vierge.

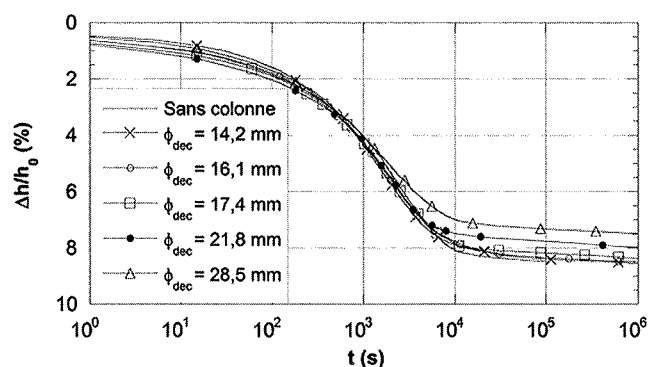


FIG. 7 Tassements des éprouvettes renforcées (mise en place sans refoulement, sans compactage).

Pour les éprouvettes contenant une colonne mise en place sans refoulement et avec compactage (mode NR-WC, Fig. 8), on observe logiquement une diminution du tassement d'autant plus importante que l'effort de compactage appliqué lors de la mise en place, et donc que le diamètre de la colonne créée est important. La réduction du tassement est plus importante que pour le cas précédent, et atteint 35 %.

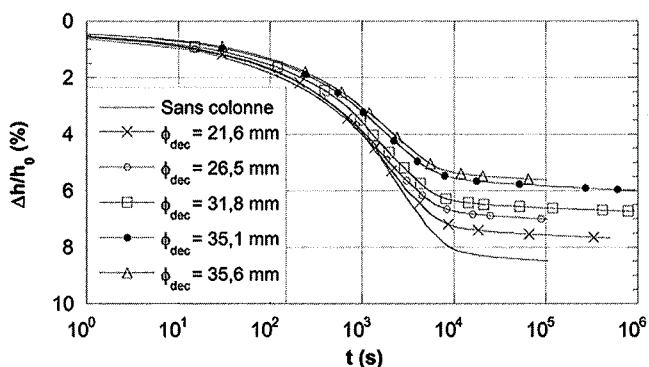


FIG. 8 Tassements des éprouvettes renforcées (mise en place sans refoulement, avec compactage).

Enfin, pour les colonnes mises en place avec refoulement et compactage (WR-WC), on observe également (Fig. 9) une diminution du tassement avec l'effort de mise en place. La réduction du tassement atteint une valeur de 32 %, proche de la valeur obtenue précédemment. Toutefois, ces valeurs de réductions de tassement ne correspondent pas aux mêmes diamètres de colonnes.

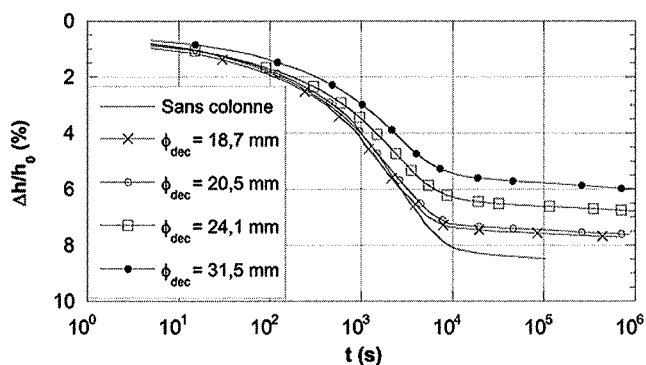


FIG. 9 Tassements des éprouvettes renforcées (mise en place avec refoulement, avec compactage).

Afin de comparer l'ensemble des résultats on définit un taux de réduction des tassements, noté Tr, défini par l'expression (3) ci-dessous :

$$Tr(\%) = \frac{\Delta h_{sc} - \Delta h_c}{\Delta h_{sc}} \times 100 \quad (3)$$

Avec :

Δh_{sc} le tassement sans renforcement (soit le tassement du massif de référence) ;

Δh_c le tassement du massif renforcé.

Compte tenu de l'allure similaire des courbes d'évolution des tassements, ceux-ci sont mesurés dans chaque cas pour un temps de 10^5 secondes.

L'évolution du paramètre Tr en fonction du diamètre de la colonne de sable et pour les différents modes de mise en place est donné en figure 10.

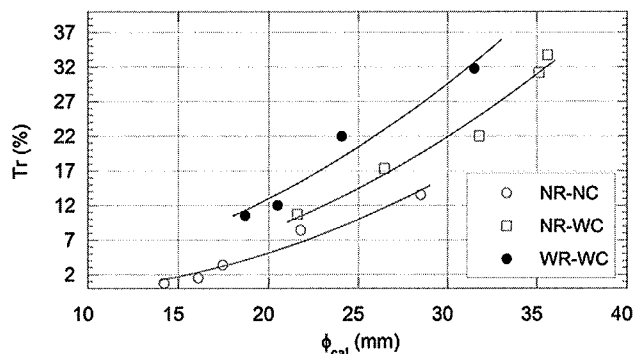


FIG. 10 Taux de réduction des tassements suivant le diamètre de la colonne.

On observe naturellement un taux de réduction de tassement croissant avec le diamètre des colonnes. On s'attend à une variation parabolique, c'est-à-dire proportionnelle à la surface.

Pour une mise en place par substitution, la méthode avec compactage conduit à un taux de réduction des tassements plus important que la méthode sans compactage. Ceci peut être attribué au fait que, lors du compactage, la déformation diamétrale de la colonne entraîne une densification du kaolin.

A diamètre égal, la méthode qui apparaît la plus efficace en termes de réduction des tassements est la méthode avec refoulement puis compactage. Cela s'explique par le fait qu'avant mise en place de la colonne de sable, le refoulement du sol fin a déjà produit une densification radiale de celui-ci. Par la suite, la déformation diamétrale du kaolin lors du compactage du sable a encore accentué le phénomène de densification et donc rigidifié le sol fin autour de la colonne.

5

Modifications des paramètres physique et mécanique du sol environnant

La figure 11 présente l'évolution de la variation de l'indice des vides en fonction du rapport r/r_{dec} (où r_{dec} est le rayon de la colonne de sable) déterminée sur différentes éprouvettes pour les différents modes de mise en place. Cette figure montre clairement une densification du sol au droit de la colonne (diminution de l'indice des vides de l'ordre de 40 %). Le sol est densifié sur une couronne d'épaisseur égale au rayon de la colonne. Il semble que l'étendue de la zone densifiée est indépendante du mode de mise en place de la colonne de sable.

A partir de cette évolution de l'indice des vides, et compte tenu de la loi d'évolution de la perméabilité avec l'indice des vides déterminée expérimentalement pour ce matériau, l'évolution de la perméabilité avec le rayon est présentée figure 12. On observe ainsi une

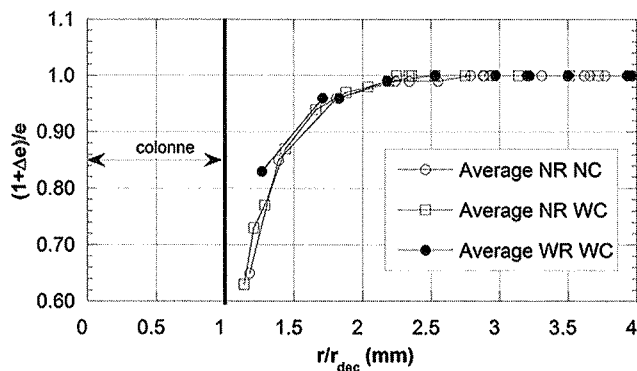


FIG. 11 Évolution radiale de l'indice des vides.

diminution de la perméabilité dans la zone densifiée. La valeur de la perméabilité dans le sol au droit de la colonne est environ quatre fois plus faible que la perméabilité initiale du kaolin.

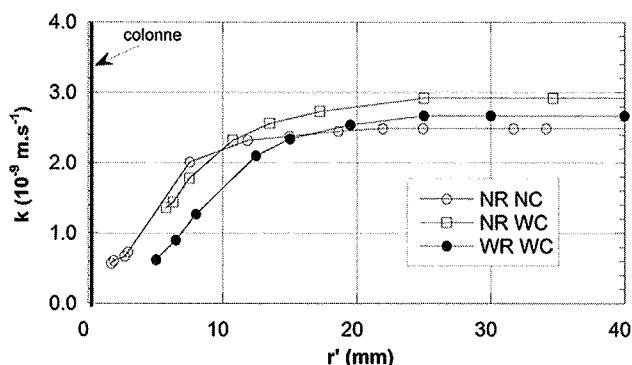


FIG. 12 Évolution de la perméabilité en fonction de la distance à la colonne.

Compte tenu de l'évolution de l'indice des vides et de la perméabilité du matériau, il est possible d'exprimer l'évolution du coefficient de consolidation C_v du matériau au sein du massif de sol (Phan *et al.*, 2010) à partir de l'expression suivante :

$$C_v(e) = \frac{k(e)}{\lambda(e) \times \gamma_w} \times \left[\exp\left(\frac{e_1 - e}{\lambda(e)}\right) \right] \times (1 + e) \quad (4)$$

Avec :

$$e = 0,77 \log(k) + 8; \lambda(e) = C_v / \ln(10) = 0,22; e_1 = 2,4.$$

On obtient alors la fonction $C_v(e)$ ci-dessous :

$$C_v(e) = \frac{10^{\left[\frac{e-8}{0,77}\right]}}{2,2} \times \left[\exp\left(\frac{2,4-e}{0,22}\right) \right] \times (1 + e) \quad (5)$$

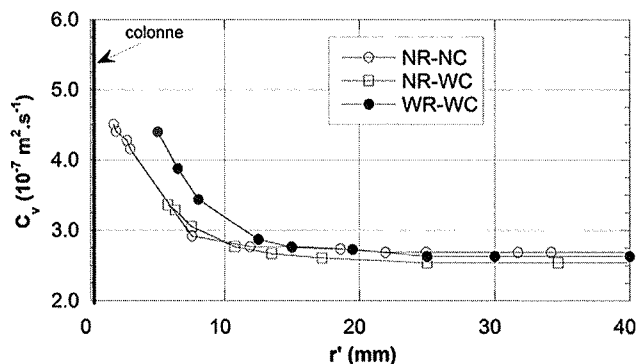


FIG. 13 Évolution du coefficient de consolidation en fonction de la distance à la colonne.

L'évolution du coefficient de consolidation suivant le rayon est donnée en figure 13. On note, malgré la diminution de la perméabilité, une augmentation du coefficient de consolidation au droit de la colonne. Cette augmentation est liée à la diminution de la compressibilité plus importante que celle de la perméabilité.

6

Conclusion

Dans cette étude, trois méthodes de mise en place de colonnes de sable dans un massif argileux ont été mises en œuvre, se différenciant par l'effort de compactage et par l'action sur le sol : substitution ou refoulement.

Le chargement des massifs de kaolin renforcés par une colonne de sable a permis d'analyser la réponse mécanique de ceux-ci. Le calcul d'un taux de réduction des tassements nous a permis de mettre en évidence l'influence du diamètre des colonnes mais également de différencier l'efficacité du renforcement suivant la méthode de mise en place : la méthode la plus efficace est celle avec refoulement du sol puis compactage du matériau granulaire, ensuite vient la méthode sans refoulement mais avec compactage du matériau incorporé et, enfin, la moins efficace est celle consistant simplement à substituer une partie du sol par un matériau granulaire. Cette hiérarchie s'explique par la présence d'une zone de sol densifiée autour de la colonne lors de la mise en place de celle-ci.

L'analyse des éprouvettes par découpage a montré que le sol était densifié sur une épaisseur égale au rayon de la colonne de sable, quel que soit l'effort de compactage et le mode de mise en place. La diminution de l'indice des vides au droit de la colonne atteint 40 %. Cette densification modifie également les caractéristiques physiques et mécaniques du matériau. Notamment, la perméabilité est divisée par 4, et le coefficient de consolidation est multiplié par 1,7. La prise en compte de ces modifications est indispensable à une modélisation correcte du comportement du sol renforcé.

Bibliographie

- Ambily A.P., Gandhi S.R. – Behavior of Stone Columns Based on Experimental and FEM Analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, p. 405-414.
- Black J., Sivakumar V., Madhav M., McCabe B. – An Improved Experimental Test Set-up to Study the Performance of Granular Columns. *Geotechnical Testing Journal*, 29 (3), 2006, p. 193-199.
- Black J., Sivakumar V., McKinley J.D. – Performance of clay samples reinforced with vertical granular columns. *Canadian Geotechnical Journal*, 44 (1), 2007, p. 89-95.
- Corneille S. – *Étude du comportement mécanique des colonnes ballastées chargées par des semelles rigides*. Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Lorraine, 2007.
- Deb K., Basudhar P.K., Chandra S. – Generalized Model for Geosynthetic-Reinforced Granular Fill-Soft Soil with Stone Columns. *International Journal of Geomechanics*, 2007, p. 266-275.
- Dhouib A., Blondeau F. – *Colonnes ballastées*. Presses des Ponts, 2005.
- Guétif Z., Bouassida M., Debats J.M. – Improved Soft Clay Characteristics Due to Stone Column Installation. *Computers and Geotechnics*, 34 (2), 2007, p. 104-111.
- Khabbazi M., Kaliakin V.N., Meehan C.L. – S3D Numerical analyses of geosynthetic encased stone columns. *International foundation congress and equipment expo*, 2009, p. 201-208.
- Murugesan S., Rajagopal K. – Geosynthetic-encased stone columns : Numerical evaluation. *Geotextiles and Geomembranes* 24, 2006, p. 349-358.
- Nguyen N.T., Foray P., Flavigny E. – Prise en compte de la mise en place dans la modélisation numérique en 3D des colonnes ballastées dans l'argile molle. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 30, 2008, p. 79-90.
- Phan V.T.P. – *Renforcement des sols compressibles par colonnes ballastées*. Thèse de doctorat, Université européenne de Bretagne, INSA de Rennes, 2010.
- Phan V.T.P., Rangeard D., Hoang V.H., Melinge Y., Perrot A. – Consolidation characteristics evolution of clay under loading. *World Congress on Particle Technology (WCPT6 2010)*, Nuremberg, Germany, 2010.
- Rangeard D., Guillard R., Sadek M. – Caractérisation mécanique d'une colonne ballastée à partir d'essais pressiométrique. *Proc. Int. Symp. 50 Years Pressuremeter*, 2005, 1, p. 637-644.
- Rollins K.M., Quimby M., Johnson S.R., Price B. – Effectiveness of Stone Columns for Liquefaction Mitigation of Silty Sands With and Without Wick Drains. *US-China Workshop on Ground Improvement Technologies*, 2009, p. 160-169.
- Sivakumar V., McKelvey D., Graham J., Hughes D. – Triaxial tests on model sand columns in clay. *Can. Geotech. J.*, 41, 2004, p. 299-312.
- Six V. – *Analyse du comportement des colonnes ballastées : influence des conditions initiales*. Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, 2006.
- Tan S.A., Tjahjono S., Oo K.K. – Simplified Plane-Strain Modeling of Stone-Column Reinforced Ground. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, p. 185-194.
- Taylor D.W. – *Foundamentals of soil mechanics*. Wiley, New York, 1948.