

# LA RÉPONSE MÉCANIQUE DES SABLES RENFORCÉS SOUMIS À DES SOLlicitATIONS MONOTONES

Said NOURI, Doctorant, département de génie civil, Université de Chlef, ALGERIE. [Nouri\\_said@yahoo.fr](mailto:Nouri_said@yahoo.fr), fax : 00 213 27 72 24 12  
 Nadir LARADI, Professeur, faculté de génie civil, U.S.T.H.B. d'Alger, ALGERIE. [nlaradi@hotmail.com](mailto:nlaradi@hotmail.com)  
 Robert CHARLIER, professeur, laboratoire de mécanique & génie civil, Université de Liège, BELGIQUE. [Robert.Charlier@ulg.ac.be](mailto:Robert.Charlier@ulg.ac.be)

## RÉSUMÉ

Dans cette recherche, on présente une étude expérimentale sur le comportement mécanique des sables renforcés par des matières plastiques soumis à des sollicitations monotones en condition non drainée. On s'intéresse, en particulier, au rôle et à l'influence des matières plastiques sur la mobilisation de la résistance au cisaillement, et sur l'évolution des propriétés mécaniques ainsi que sur les variations de volume (dilatance et contractance) du matériau composite (sable plastique). Les résultats des essais triaxiaux monotones réalisés montrent que la présence des matières plastiques dans le sable permet de transformer le comportement fragile du sable en un comportement plus ductile.

## Mots-Clés

Sable, Comportement, Cisaillement, Triaxial, Renforcement, Monotone, Dilatance, Contractance, Pression interstitielle, Plastique.

## 1. INTRODUCTION

Le renforcement des sols regroupe un ensemble de techniques consistant à améliorer la résistance initiale et les caractéristiques mécaniques du sol par des inclusions résistantes, parmi eux métalliques, textiles et plastiques. Le principe de ces techniques repose sur la mobilisation des efforts de traction induits dans le sol par les chargements extérieurs.

Coulet, Rakotondramanitra et al. (1985, 1986, 1987) ont proposés un procédé de renforcement géotechnique basé sur l'association de matières plastiques et de terre qui permet d'améliorer les caractéristiques mécaniques des sols. Ce procédé est appelé le plâsterre (Rakotondramanitra, 1988 et Dali, 1989).

Malgré les nombreuses expériences au triaxial (Dali et al, 1989), et à la boîte de cisaillement (Messas, 1997), ce domaine n'est jusqu'à présent pas totalement maîtrisé et en particulier dans le cas du comportement monotone et cyclique. C'est dans cette perspective que s'inscrit le présent travail qui est consacré sur les principaux résultats d'essais triaxiaux à chargement monotone en condition non drainée d'un sable renforcé par des nappes continues de matières plastiques pour montrer l'effet de ces derniers sur le comportement contraintes déformations et sur la résistance de cisaillement du sable ainsi que sur la variation de la pression interstitielle dans l'éprouvette.

## 2. DISPOSITIFS D'ESSAIS

Le dispositif expérimental (figure 1) utilisé pour cette étude est constitué d'une cellule triaxiale permettant de solliciter des éprouvettes cylindriques d'un diamètre de 70 mm et d'une hauteur de 70 mm. Cette cellule est placée sur une presse ayant une capacité de 40 kN. Les essais triaxiaux sont réalisés à taux de déformation contrôlé (0.23 % par minute) en condition non drainée.

La cellule est équipée des deux contrôleurs de pression (GDS), qui permettent d'assurer le confinement de l'échantillon et le contrôle de sa variation volumique. Il peut être commandé par ordinateur (Interface Standard, IEEE-488).

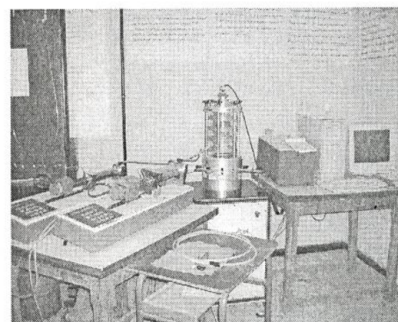


Figure 1: Dispositif expérimental: vue d'ensemble de la cellule triaxiale, deux contrôleurs GDS et chaîne d'acquisition.

## 3. MATÉRIAUX ET MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

### 3.1. MATÉRIAUX UTILISÉS

#### 3.1.1. IDENTIFICATION DU SOL

Le sol utilisé au cours des essais est un sable moyen à gros uniforme provenant du lit d'Oued Chlef (Oued traverse la ville de Chlef, ex. El-Asnam). La courbe de l'analyse granulométrique est représentée sur la figure 2. Les propriétés physiques du sable sont répertoriées dans le tableau 1.

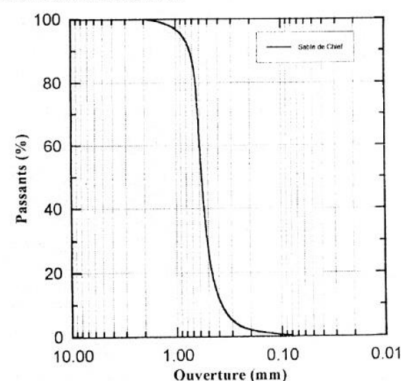


Figure 2 : La courbe granulométrique du sable de Chlef.

D <sub>50</sub>	C <sub>u</sub>	e <sub>min</sub>	e <sub>max</sub>	γ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	γ <sub>dmin</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	γ <sub>dmax</sub> (kN/m <sup>3</sup> )
0.55	2.15	0.64	0.99	2.65	12.90	15.66

Tableau 1: propriétés physiques du sable de Chlef.

3.1.2. MATÉRIAU DE RENFORCEMENT

Le renforcement du sable a été effectué par des nappes de matières plastiques commercialement disponibles qui sont des feuilles de polyéthylène translucide de basse densité de couleur blanche (films agricoles). Les caractéristiques physiques et mécaniques de ce matériau sont présentées dans le tableau 2.

Masses surfacique (g/m <sup>2</sup> )	Masses volumique (g/m <sup>3</sup> )	Epaisseur (mm)	Ouverture de filtration (mm)	Angle de frottement sable/plastique	Max résistance de traction (kN/m)	Max déformation (%)
125	924	0.18-0.20	<0.2	33°	1.8	340

Tableau 2 : caractéristiques mécaniques et physiques du plastique.

3. 2. MODE OPÉRATEOIRE ET ESSAIS RÉALISÉS

Les échantillons sont adoptés par compactage en cinq couches comme recommandé par Bishop et Henkel (1969), Ladd (1978), et Head (1986). La densité relative du sable a été maintenue constante autour de 50 % (sable moyennement dense). Après chaque couche de sable compacté et nivelé, le renforcement a été placé dans l'éprouvette horizontalement. Le diamètre du renforcement était légèrement moins que celle de l'échantillon. Après la phase de consolidation, l'échantillon est soumis à un chargement triaxial monotone sous une contrainte de confinement moyenne de 100 kPa en condition non drainée.

Le programme expérimental consiste à réaliser des essais triaxiaux monotones non drainés d'un sable non renforcé et renforcé par différentes nappes de matières plastiques avec une variété de l'emplacement de ces nappes (comme le montre la figure 3).

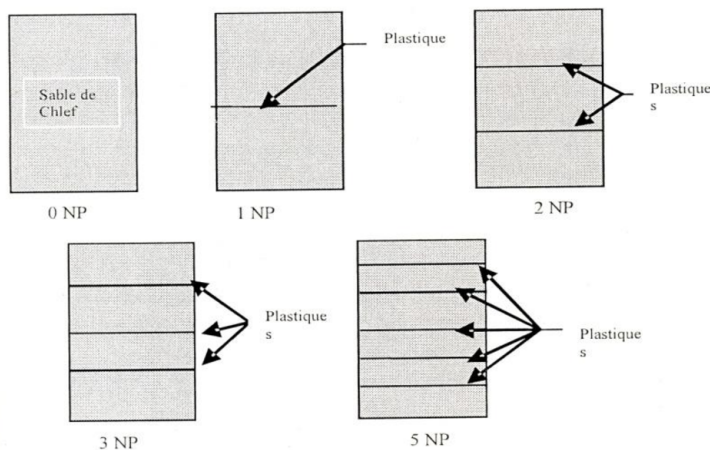


Figure 3 : Essais triaxiaux monotones non drainés sur le sable renforcé.

4. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 COMPORTEMENT CONTRAINTE DÉVIATOIRE-DÉFORMATION AXIALE

Le comportement contrainte déviatoire-déformation axiale du sable non renforcé et renforcé par différents nombre de nappes de matières plastiques est illustré dans la figure 4. Les courbes de cette

figure indiquent que le comportement contrainte déformation axiale du sable renforcé est très différent non renforcé. Le sable non renforcé atteint le pic de bout de 15 % de la déformation, alors que l'échantil renforcé par des nappes plastiques n'expose aucun pic et on constate aussi qu'avec un renforcement plu linéarités sont plus accentuées dans le sable renforcé non renforcé et la déformation monotone est ne importante dans le sable non renforcé que dans le sa pour un même déviateur appliqué. Cette différence renforcement.

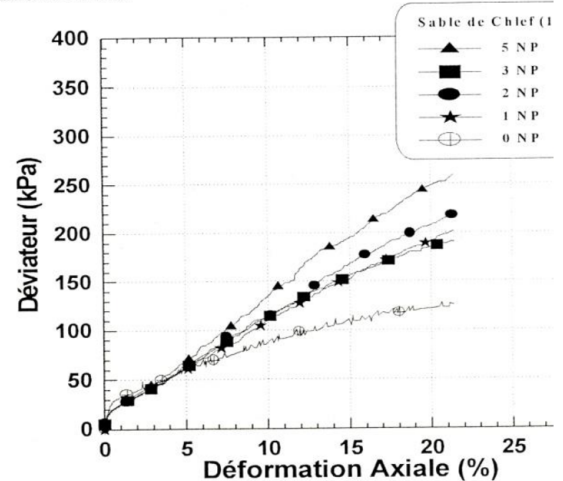


Figure 4 : Comportement contrainte déformation du : par des nappes plastiques.

Le tableau 3 montre l'augmentation de la r cisaillement du sable renforcé par des nappes | fonction des déformations axiales de 20 % et 10 déformation de 20 % l'augmentation de la résistat environ de 27 108 % suivant le nombre de nappes de utilisé de 1, 2, 3, et 5 respectivement. Alors dans le axiale égale à 10 % (p. ex, moitié de la déformat critère de rupture), l'augmentation de la résistance significative p. ex, 5 57 % suivant le nombre c renforcement de 1, 2, 3, et 5.

Nombre de nappes de renforcement	Déformation axiale 20 %		Déformati
	Résistance principale majeure (kPa)	% augmentation de résistance	Résistance principale majeure (kPa)
0 NP	121	-	86
1 NP	154	27	90
2 NP	199	64	110
3 NP	185	53	115
5 NP	252	108	135

Tableau 3 : Augmentation de la résistance de cisaille renforcé.

Les résultats ainsi obtenus montrent clairement q des nappes plastiques dans le sable améliore consid contrainte déviatoire monotone en une déform importante d'environ 20 % (aller jusqu' à 108 % par du sable non renforcé).

Comme mentionnée au début, la résistance au ci sable renforcé par des nappes plastiques est affectée de nappes de renforcement. La résistance du s augmente avec l'augmentation du nombre de nappes de cette augmentation est grand à partir du faible non (NP > 1). L'amélioration de la résistance dans le est due au développement de la résistance de tra nappes.

Les renforcements sont restés intacts dans tous les échantillons après le test. C'est en accord avec l'observation de Gris et Al-Refeai (1986) pendant leurs expériences avec le sable renforcé par géotextile.

#### 4.2 DÉVIATEUR DE PRESSION INTERSTITIELLE

La variation du déviateur de pressions interstitielles en fonction de déformations axiales pour un sable non renforcé et sable renforcé par des nappes plastiques est présentée dans la figure 5.

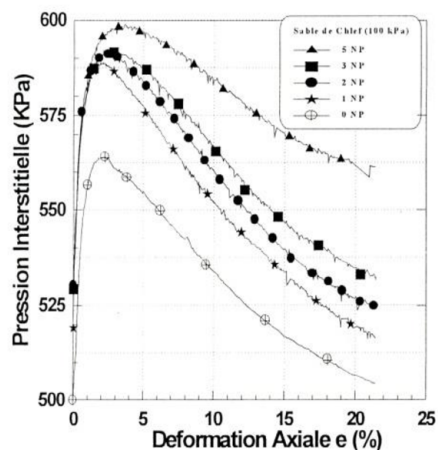


Figure 5 : Evolution de la pression interstitielle-déformation axiale

L'étude de cette figure indique que :

- pour le sable non renforcé, le comportement dilatant est observé après la phase de contractance (due au début de chargement) et se traduit par une chute importante et très rapide de la pression interstitielle, induisant une augmentation rapide de la pression moyenne effective, et, par conséquent à une amélioration de la résistance du sable à la compression non drainée.

- La présence des nappes de renforcements a pour effet d'amplifier la phase d'augmentation de la pression interstitielle (phase de contractance) et de réduire sensiblement la phase de réduction de cette pression, et, par conséquent de réduire la résistance à la compression non drainée. Cette augmentation de la contractance est principalement induite par la compressibilité des nappes plastiques. Ce résultat est observé pour un faible nombre de nappes plastiques (NP = 1) et s'accroît quand le nombre croît à 5 nappes (NP = 5). Ce phénomène est en accord avec ce trouvé par différents auteurs (Billet, Cordary et Richa 1989).

- L'examen de ces résultats montre que le comportement de dilatance des échantillons renforcés est affecté par la présence des nappes plastiques. Cette augmentation dans le sable renforcé est due à la décroissance de la pression interstitielle qui se manifeste par une reprise de résistance au cisaillement.

#### 4.3 CHEMIN DE CONTRAINTE DANS LE PLAN ( $p'$ , $q$ )

Dans le plan déviateur de contrainte pression moyenne effective, permet, quant à lui, de représenter les chemins des contraintes effectives suivis pendant le cisaillement, qui sont, dans le cas non drainés, des courbes avec un point anguleux, plus ou moins marqué, avec remontée du chemins vers la droite de rupture, le point anguleux correspondant pratiquement au franchissement du seuil caractéristiques (Luong, 1980). La phase se traduit par une chute de la pression moyenne effective (phase de contractance) puis celle-ci réaugmente et le chemin de contrainte suit la courbe de rupture (phase de dilatance).

Les résultats présentés sur la figure 6 montrent les comportements non drainés du sable non renforcé et renforcé par des nappes plastiques. On constate que le non drainage (condition de volume constant) entraîne un comportement très stable, continuellement durcissant, pour le sable renforcé ou non, avec un pic moins marqué de résistance au cisaillement non drainé.

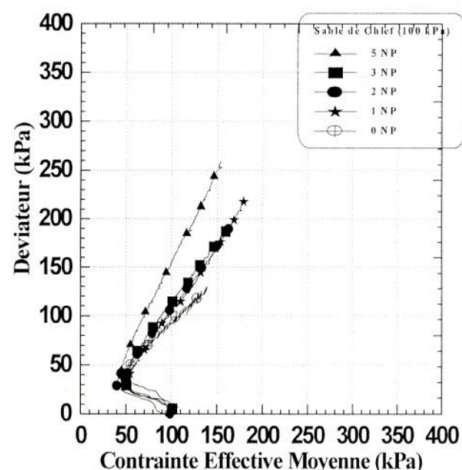


Figure 6 : Chemins de contrainte dans le plan ( $q$ ,  $p'$ ).

Pour le sable renforcé, on observe un point anguleux moins marqué par rapport au sable non renforcé, pour lequel le minimum de résistance est obtenu correspond au passage entre contractance et dilatance, et donc à l'état caractéristique. Les résultats confirment le passage continu du comportement métastable (contractant) au comportement très stable (dilatant).

Dans la phase de contractance, les courbes de rupture sont pratiquement les mêmes pour le sable renforcé ou non avec une pression moyenne constante de 50 kPa pour une contrainte totale de 40 kPa, par contre dans la phase de dilatance les courbes de rupture sont linéaires avec une pression moyenne de 140 kPa pour une contrainte totale de 130 kPa et l'angle de frottement moyen déduit de cette droite est de  $23^{\circ}.3$  pour le sable non renforcé et varie de  $29^{\circ}.6$  à  $41^{\circ}.2$  avec une pression moyenne de 160 kPa pour une contrainte totale de 260 kPa pour les sables renforcés par 1, 2, 3, 5 nappes plastiques respectivement.

#### 5. CONCLUSION

Bien que les résultats soient partiels on note que, le renforcement par inclusion des nappes plastiques apporte un gain de résistance au cisaillement appréciable aussi bien au sol vierge qu'au sol renforcé sous charges monotones. Les essais monotones effectués sur de sable renforcé par des nappes continues de matières plastiques, ont montré que :

- Plus le nombre de nappes plastiques augmente, plus les contraintes déviatoires monotones sont importantes.

- Les nappes plastiques de renforcement causent significativement l'amélioration de la résistance au cisaillement du sable, ainsi qu'une grande ductilité dans le matériau composite (sable nappes plastiques).

- la présence des nappes plastiques amplifie la phase de contractance, ce qui se traduit lors des essais non drainés par une augmentation de la pression d'eau et une réduction de la contrainte moyenne effective.

- Le renforcement augmente le comportement de dilatance du sable, cette augmentation est due à la décroissance de la pression d'eau qui se manifeste par une reprise de résistance au cisaillement.

- Pour le sable renforcé ou non la courbe de rupture est pratiquement linéaire dans le domaine de pression moyenne allant de 30 à 130 kPa, l'angle de frottement déduit de cette droite est de  $23^{\circ}.3$ , tandis que pour le sable renforcé le domaine de pression moyenne effective allant de 50 à 250 kPa avec un angle de frottement varie de  $29^{\circ}.6$  à  $41^{\circ}.2$  suivant le nombre de nappes utilisé pour le renforcement.

Enfin, l'utilisation des nappes de matières plastiques permet, d'une part, d'améliorer les caractéristiques mécaniques des sols et, d'autre part, de construire une solution économique et écologique aux problèmes posés par leurs déchets.

### 6. BIBLIOGRAPHIE

**Bouferra R., Shahrour I. (2000).** "Etude expérimentale de l'influence des éléments fins sur le potentiel de liquéfaction des sols". 3<sup>ème</sup> Symposium International sur le Génie Sismique, Chlef, 9, 10 et 11 Octobre 2000, p. 193-202.

**Consoli N. C., Montardo J. P., Prietto P.D.M., Passa G. S. (2002).** "Engineering behaviour of sand reinforced with plastic waste". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 128, n° 6, p.462-472.

**Gopal Ranjan, Vasan R. M. et Charan H. D. (1994).** "Behaviour of plastic-fiber-reinforced sand". Geotextiles and Geomembranes, n° 13, p. 555-565.

**Gray D. H., Asce A. M., Ohashi H. (1983).** "Mechanics of fiber reinforcement in sand". Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 109, n° 3, p.335-353.

**Haeri S. M., Noorzad R., Oskoorouchi A. M. (2000).** "Effect of geotextile reinforcement on the mechanical behaviour of sand". Geotextiles and Geomembranes, n° 18, p. 385-402.

**Messas T. (1999).** "Caractérisation et renforcement des sols avec inclusion de nappes plastiques souples discontinues". Revue Française de Géotechnique, n° 87, p. 55-62.

**Nouri S., Laradi N. (2004).** "Renforcement et amélioration des sols par l'utilisation des déchets de matières plastiques". Colloque International de Géotechnique, Beyrouth, 19-22 Mai 2004, p. 309-316.

**Nouri S., Laradi N. Charlier R. (2005).** "Effet de renforcement par nappes plastiques sur le comportement du sable". 4eme Symposium International sur la construction, Chlef, 22, 23 et 24 Novembre 2005, p. 132-138.