

AMELIORATION DES CARACTERISTIQUES MECANQUES DES SOLS PAR UTILISATION DES MATIERES PLASTIQUES

T. Messas

Docteur, L2M, IUTA Génie Civil, Lyon 1

C. Coulet, R. Azouz & L. Curtil

Docteurs, Enseignants - Chercheurs, L2M, IUTA Génie Civil, Lyon 1

Résumé

Les déchets de matières plastiques peuvent constituer des nappes de renforts discontinues pour améliorer les caractéristiques mécaniques des sols des remblais. Des essais effectués sur une boîte à plan de cisaillement vertical, qui respecte mieux les réalités de champs de contraintes, ont permis de quantifier la résistance à la traction apportée par ces renforts. Une correspondance a été établie avec les valeurs obtenues pour des nappes continues.

Mots clés : Renforcement • sol • essai de cisaillement • déchets plastiques.

1 INTRODUCTION :

La production de déchets de matières plastiques ne cesse de croître. Le procédé Plasterre [3] permet de valoriser les déchets de plastique souple en les réemployant comme structure de renfort pour améliorer les caractéristiques mécaniques des sols des remblais. Les nappes de déchets, régulièrement espacées sur la hauteur du remblai, sont constituées d'éléments discontinus dont il faut déterminer le comportement.

L'approche expérimentale est abordée avec des essais comparatifs entre des nappes d'éléments discontinues et les nappes continues, comme les géotextiles, qui permettent de dimensionner les remblais renforcés à l'aide des codes de calcul classiques.

Afin de représenter le mode réel de rupture lors d'un glissement d'un remblai renforcé (Figure 1), nous avons mis au point un essai original à plan de cisaillement vertical. Pour cela, un appareil a été conçu et construit. La nappe de renfort est disposée horizontalement et les champs de contraintes sont plus conformes à la réalité. Des séries d'essais ont permis de

mesurer l'influence de deux paramètres : la taille et la masse surfacique des éléments discontinus de renfort.

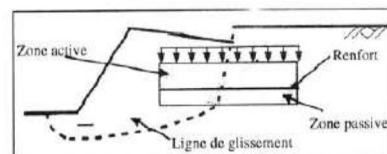


Figure 1 : Glissement d'un remblai.

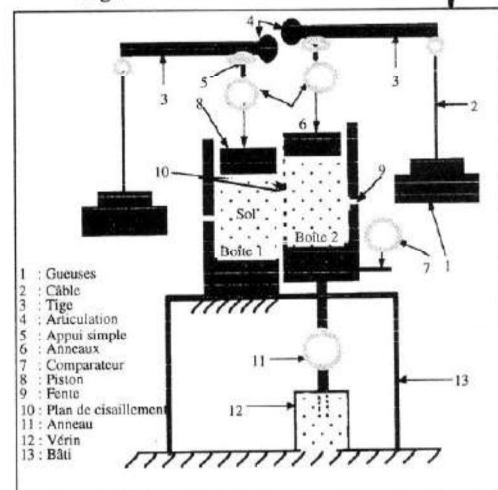


Figure 2 : Schéma de principe du dispositif expérimental de l'essai à plan de cisaillement vertical

2 MATERIEL ET PROGRAMME EXPERIMENTAUX

2.1 Appareillage

L'appareil utilisé comprend (Figure 2) :

- Une cuve de dimensions de 600mm de longueur, 400mm de largeur, 465mm de hauteur. Ses parois sont très rigides afin que soient supprimées vibrations et déformations. Les parois latérales sont munies de deux fentes pour permettre le passage de l'inclusion de renfort.

Afin de visualiser les déplacements à l'intérieur, la paroi frontale est transparente. Pour rassembler les deux zones (active et passive) du massif lors du glissement de celui-ci, cette cuve est partagée en deux boîtes identiques (300mm x 400mm x 465mm), l'une (boîte N°2) mobile et l'autre (boîte N°1) fixe. Elles sont supportées par des portiques de grandes rigidités.

- Un vérin mécanique d'une capacité de 50 KN, ancré en position verticale permet de déplacer de la boîte N°2. Pour l'ensemble de ces essais, la vitesse est de 1mm/mn. Afin de mesurer l'effort de cisaillement, nous avons incorporé un anneau dynamométrique entre le vérin et la boîte N°2. Sur le bord supérieur de celle-ci, nous avons placé un comparateur de course de 100mm qui permet de suivre le déplacement vertical.

- Un système de chargement vertical du matériau.

2.2 Matériaux

Le sol utilisé au cours des essais est une grave concassée provenant des carrières de la région lyonnaise, de granulométrie étroite comprise entre 5mm et 12mm. Pour obtenir une bonne reproductibilité des essais, la teneur en eau est nulle.

2.3 Matières plastiques

Le renforcement de la grave a été effectué par des nappes de deux types de déchets :

- Feuilles de polyéthylène translucide de couleur blanche, de masse surfacique égale à 125 g/m² et d'une résistance de traction à la rupture de 1.8 KN/m ;
- Déchets de matières plastiques souples constitués essentiellement de sachets d'emballages.

Les différents essais réalisés sont portés au tableau 1.

N° d'essais	Types d'essais
1	Grave seule.
2	Grave renforcée par nappe de deux feuilles ancrées.
3	Grave renforcée par nappe de quatre feuilles ancrées.
4	Grave renforcée par nappe de morceaux plastiques (60 x 40cm ²)
5	Grave renforcée par nappe de morceaux plastiques (30 x 40cm ²)
6	Grave renforcée par nappe de morceaux plastiques (20 x 40cm ²)
7	Grave renforcée par nappe de morceaux plastiques (10 x 40cm ²)
8	Grave renforcée par nappe en déchets plastiques.

Tableau 1 : Différents types d'essais réalisés.

3 RENFORCEMENT PAR DES NAPPES CONTINUES :

Afin de montrer l'influence du mode d'ancrage des nappes, nous avons effectué des essais de cisaillement du sol renforcé par nappes plastiques ancrées. Nous remarquons que les courbes contraintes-déplacements obtenues (Figure 3) présentent un comportement de type pic-palier d'effort.

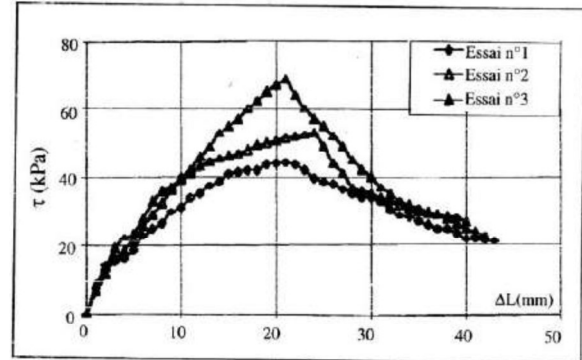


Figure 3 : Courbes contraintes de cisaillement-déplacement pour $\sigma = 54.5$ kPa.

Ces courbes prennent la même allure au début et divergent après un certain déplacement. Elles peuvent présenter trois phases de déplacement :

- La phase d'élasticité :

C'est la phase de mise en place du grain de gravier. Au départ, pour les faibles déplacements, les courbes présentent une partie quasi-linéaire. Nous constatons que la résistance de cisaillement est la même avec ou sans nappe plastique.

- La phase d'écrouissage :

Elle précède la phase de rupture. Dans cette phase, l'influence de la nappe plastique est remarquable. La résistance de cisaillement maximale varie selon le nombre de feuilles qui forment chaque nappe. Les pics de contraintes de cisaillement sont atteints pour des déplacements (Δl) compris entre 20mm et 24mm,

- La phase de plasticité :

Nous constatons dans cette phase, la chute des contraintes dans le cas de cisaillement du gravier renforcé par nappes ancrées. Ceci peut s'expliquer par le fait que les feuilles plastiques soient déchirées. Elles sont à la rupture. Nous nous rapprochons du sol non-renforcé. Lorsque le pic est bien marqué, le radoucissement peut être très rapide et l'effort résiduel est alors obtenu pour des déplacements n'excédant pas 30mm. Dans d'autres cas, le radoucissement est très progressif et l'effort résiduel est alors atteint pour des déplacements supérieurs à 40mm. La comparaison de ces courbes montre que l'écart entre l'effort au pic et l'effort résiduel est d'autant plus fort que l'effort au pic est important.

Afin de simuler un renfort continu dont l'ancrage est parfaitement assuré, les nappes sont fixées à leurs

extrémités. La valeur maximale de la contrainte de cisaillement est bien évidemment obtenue à la rupture des nappes. L'augmentation de la résistance au cisaillement par les nappes de plastique se traduit par l'apparition d'une pseudo-cohésion (Figure 4), tandis que l'angle de frottement reste constant. Conformément aux observations faites à partir des essais triaxiaux ou d'essais de cisaillement à plan horizontal le frottement apparent (μ) diminue en fonction de la contrainte normale (Figure 5).

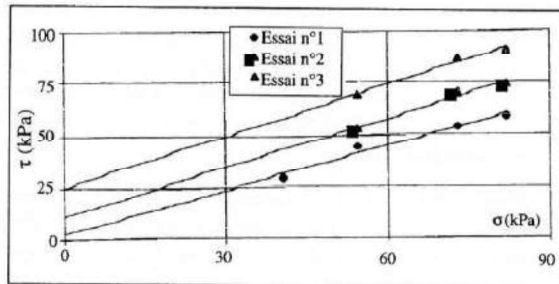


Figure 4 : Le fuseau des courbes intrinsèques au pic.

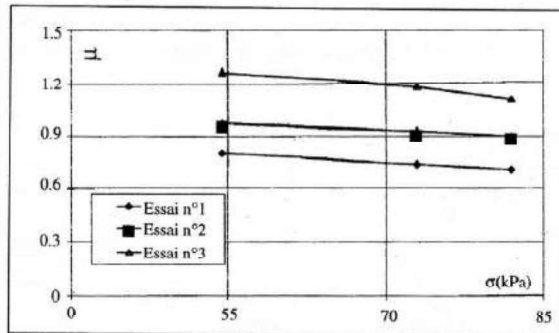


Figure 5 : Variation du coefficient de frottement apparent en fonction de la contrainte normale. (Influence du mode d'ancrage).

Le déplacement de la demi-boîte n°2 développe deux zones d'actions dans le massif : l'une est active (le sol de demi-boîte N°2) et l'autre est passive (le sol de demi-boîte n°1) (Figure 2). Nous supposons que le sol est en équilibre plastique le long du plan de rupture AD. Les différentes forces s'exerçant sur le prisme ABCD (la demi-boîte N°2) (Figure 6) sont :

- q_2 : La surcharge appliquée sur la demi-boîte N°2 (la zone active).
- P_s : Le poids du sol de la zone active.
- R : La réaction du sol sur le plan de rupture AD. D'après l'hypothèse d'état de rupture du sol, cette réaction est inclinée d'un angle ϕ par rapport à la normale au plan rupture.
- T_v : L'effort de cisaillement donné par le vérin.
- T_vo : L'effort de frottement du système à vide.
- T : L'effort de cisaillement effectif.
- T_p : La force maximale mobilisée dans la nappe plastique.
- N : L'effort normal dû aux charges verticales (surcharges, poids du sol).

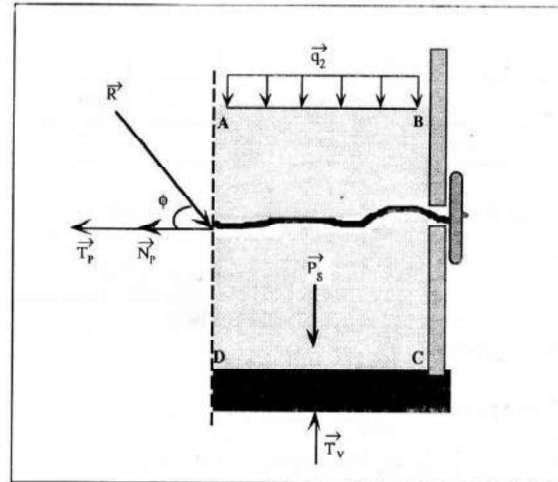


Figure 6 : Bilan des forces extérieures agissant sur le sol contenu dans la demi-boîte mobile.

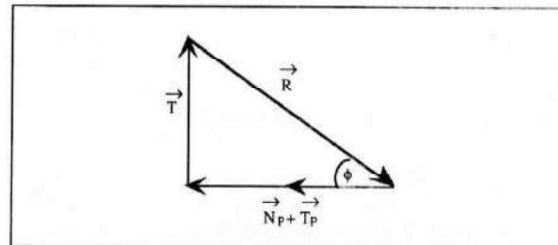


Figure 7 : Diagramme d'équilibre des forces.

L'équilibre de ces forces à la rupture présenté par le diagramme de la figure 7, nous permet d'écrire :

$$T = (N + T_p) \operatorname{tg} \phi \quad (1)$$

La surface de cisaillement S_c varie en fonction du déplacement :

$$\begin{aligned} T/S_c &= (N/S_c + T_p/S_c) \operatorname{tg} \phi \\ \Rightarrow \tau &= \sigma \operatorname{tg} \phi + (T_p/S_c) \operatorname{tg} \phi \end{aligned} \quad (2)$$

En identifiant la relation (1) avec la loi de Coulomb ($\tau = \sigma \operatorname{tg} \phi + C$) nous pouvons déduire l'accroissement d'une pseudo-cohésion ΔC .

$$\Delta C = n \cdot T_{pr} \cdot L \cdot \operatorname{tg} \phi / S_c \quad (3)$$

où :

N : le nombre de feuilles plastiques.

T_{pr} : la résistance de la traction de feuille plastique à la rupture.

L : la largeur des feuilles plastiques.

ϕ : l'angle de frottement interne du sol.

Le tableau 2 compare les valeurs de ΔC calculées aux valeurs mesurées lors des essais de cisaillement. Compte-tenu des précisions de mesures, la concordance est jugée acceptable.

Types d'essais	ΔC_{exp} (kPa)	ΔC_{th} (kPa)
- Grave renforcée par nappe de deux feuilles.	9	13
- Grave renforcée par nappe de quatre feuilles.	22	25

Tableau 2 : Valeurs du gain en cohésions théorique et expérimentale apporté par la présence des nappes continues.

4 RENFORCEMENT PAR DES NAPPES DISCONTINUES

4.1 Expérimentation :

L'étude des nappes discontinues est conduite comparativement avec celle des nappes continues, en faisant varier deux paramètres : la dimension des éléments et leur répartition en masse. L'objectif de ces essais est de trouver une relation entre l'apport en cohésion des nappes discontinues et l'apport des nappes continues afin de pouvoir caractériser les nappes discontinues par une certaine résistance à la traction T_p qui est calculée à partir de la formule 3.

$$T_p = \Delta C_{exp} \cdot S_c / L \cdot \tan \phi \quad (4)$$

Contrairement à l'approche par nappes continues, cette résistance à la traction T_p ne correspond pas à la rupture d'un élément mais à la rupture de la nappe par glissement des éléments les uns par rapport aux autres. Le tableau 3 donne l'ensemble des résultats où l'on constate évidemment la croissance de T_p en fonction de l'augmentation de la taille des éléments.

	Masse (g)	60	120	210	270	300	540	660	1200
	Masse surfacique (kg/m ²)	0.25	0.5	0.87	1.1	1.2	2.2	2.7	5
Grave renforcée par nappe de morceaux plastiques (60 cm x 40 cm).	ΔC_{exp} (kPa)	5.1	14.8	20	-	-	-	-	-
	$T_p = \Delta C_{exp} \cdot S_c / L \cdot \tan \phi$ (kN/m)	1.6	5.2	6.3	-	-	-	-	-
Grave renforcée par nappe de morceaux plastiques (30 cm x 40 cm).	ΔC_{exp} (kPa)	-	-	-	7	8	13.3	15.6	18.7
	$T_p = \Delta C_{exp} \cdot S_c / L \cdot \tan \phi$ (kN/m)	-	-	-	2.2	2.5	4.2	4.9	5.9
Grave renforcée par nappe de morceaux plastiques (20 cm x 40 cm).	ΔC_{exp} (kPa)	-	-	-	5	6	11.4	13.6	16.2
	$T_p = \Delta C_{exp} \cdot S_c / L \cdot \tan \phi$ (kN/m)	-	-	-	1.6	1.9	3.6	4.3	5.1
Grave renforcée par nappe de morceaux plastiques (10 cm x 40 cm).	ΔC_{exp} (kPa)	-	-	-	2.8	3.1	5.7	6.6	7.6
	$T_p = \Delta C_{exp} \cdot S_c / L \cdot \tan \phi$ (kN/m)	-	-	-	0.9	1	1.8	2.1	2.4
Grave renforcée par nappe en déchets plastiques.	ΔC_{exp} (kPa)	-	-	-	5.7	6.6	12.7	14.6	17.1
	$T_p = \Delta C_{exp} \cdot S_c / L \cdot \tan \phi$ (kN/m)	-	-	-	1.8	2.1	4	4.6	5.4

Tableau 3 : Valeurs de résistances à la traction en service des nappes plastiques en morceaux.

L'évolution du rapport de la contrainte de cisaillement maximale (R.C.M = τ_0/τ) en fonction de la forme géométrique des morceaux plastiques est représentée sur la figure 8 (τ et τ_0 sont des contraintes de cisaillement du gravier renforcé et non renforcé).

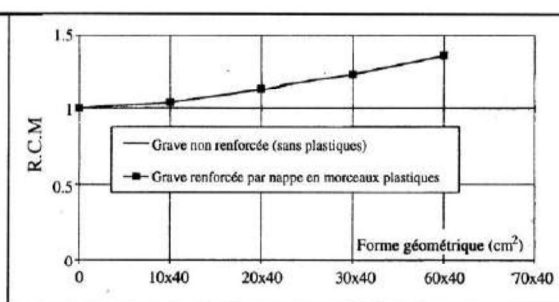


Figure 8 : Evolution du rapport de la contrainte de cisaillement maximale (R.C.M) en fonction de la forme géométrique des morceaux plastiques ($\sigma = 54.5$ kPa et $M = 1$ kg/m²).

Pour une taille donnée, T_p croît avec l'augmentation de la masse jusqu'à une valeur palier (Figure 9). Les essais de graves renforcés par nappe de longueur de recouvrement de moins de 10cm, ont été exclus car nous estimons que l'apport du renforcement dans ce cas est négligeable. Pour mieux approcher la réalité des renforts par déchets, des essais ont été également effectués avec des nappes formées de sacs d'emballages souples.

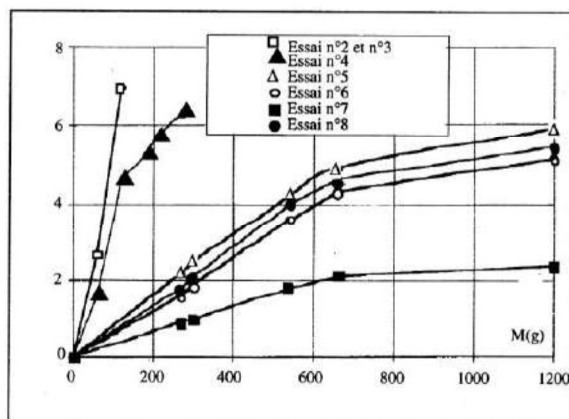


Figure 9 : Résistance à la traction en service de la nappe en matières plastiques.

4.2 Exploitation :

La courbe 9 permet de faire la correspondance entre la résistance à la traction des nappes discontinues et celle équivalente des nappes continues. Le rapport d'équivalence R_E varie fortement avec d'une part la taille des éléments de renfort et d'autre part la résistance à la traction recherchée (tableau 4).

On peut noter que pour obtenir une continuité équivalente satisfaisante, la taille des éléments doit être au minimum de 30 cm et quand elle atteint 60 cm, la valeur de R_E est égale à 5 pour des résistances à la traction T_p de 8 kN/m. Dans ce cas on obtient des résultats tout à fait comparables avec certains géotextiles.

T _p (KN/m)	R _E *				
	Essai N° 4C	Essai N° 5C	Essai N° 6C	Essai N° 7C	Essai N° 8C
2	2	6.8	8.1	16	7.8
3	1.6	6.6	7.9	-	6.9
4	1.7	7.1	7.8	-	7.5
5	1.8	7.6	97	-	7.8

* R_E = (Masse des morceaux des nappes discontinues) / (Masse des feuilles des nappes continues)

Tableau 4 : Valeurs des rapports équivalents des quantités de matières plastiques pour une résistance en service donné.

5 CONCLUSION :

- Les essais effectués avec des nappes plastiques non ancrées offrent une résistance moins grande que ceux effectués avec des nappes plastiques ancrées, surtout pour un déplacement important. Cette différence est la conséquence d'une efficacité considérable de résistance à la traction de la part des feuilles plastiques lorsque celles-ci sont ancrées.
- Le plastique augmente nettement la résistance de cisaillement, lorsqu'il est mis en tension sous des grands déplacements.
- L'adjonction aux sols de nappes d'éléments de matière plastiques discontinues entraîne une amélioration notable des caractéristiques mécaniques des sols. Cette amélioration a été quantifiée avec le calcul d'une pseudo-cohésion.
- Lorsque la taille des éléments avoisine 60cm x 40 cm et que la quantité des matières plastiques est suffisante, le comportement du renfort discontinu tend vers un comportement de nappes continues.
- La résistance à la traction en service de la nappe discontinue ayant une masse M correspond à celle

apportée par une nappe continue ayant une masse M/5 en feuilles.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] A. Collios, P. Delmas, J.P. Gourc & J.P. Giroud : "Experiments on soil reinforcement with geotextiles". The use of geotextiles for soil improvement. ASCE Nat. Conv. April, pp. 53-73, Portland, Oregon, 1980.
- [2] C. Coulet, J.D. Rakotondramanitra & J. Bacot : "Soil reinforcement study making use of waste plastic materials with a large triaxial cell". 14th conference international, Building Foundation, BRNO, Tchécoslovaquie, 1986.
- [3] C. Coulet, J.D. Rakotondramanitra & J. Bacot : "Sol reinforcement making use of waste plastic materials study with large shear box machine". VIII National Conference on soil mechanics and foundation engineering, Wroclaw, Poland, 1987.
- [4] J. Gielly, C. Coulet & J. Perrin : "Renforcement des sols avec le procédé plasterre". 12th International Conference on soil mechanics and foundation engineering. P 1249-1250, 13-18 août 1989, Rio de Janeiro, Brésil 1989.
- [5] K. Omine, H. Ochiai, N. Yasufuku & T. Kato : "Effet of plastic wastes in improving cement treated soils". Environmental Geotechnics, Kamon Balkema, Vol. II p.875 - 880, Rotterdam, 1996.
- [6] T. Messas, R. Azzouz, C. Coulet & L. Curtil : "Soil reinforcement by using layers of soft or discontinuous plastic wastes". Green2 - and International symposium on géotechnics and the environment 8-11 September 1997, Krakow, Poland, 1997.