

# CARACTÉRISATION MÉCANIQUE D'UN SABLE RENFORCÉ PAR DIFFÉRENTS TYPES DE GÉOTEXTILES

**Benchohra KARAA**

Magister Génie Civil Maître Assistant ENTP Kouba

**Mohamed TAKI**

Dr Ingénieur, Maître de Conférence ENTP Kouba

**Résumé** Cette étude expérimentale fournit les résultats des essais de laboratoire, de cisaillement triaxial grand modèle obtenus au cours des études relatifs aux interfaces en fonctions :

- ◆ De la nature du sol.
- ◆ De la nature du Géotextile.

**Mots clés :** Renforcement-sol - Géotextile - Interaction- frottement - Triaxial- cisaillement.

## 1-INTRODUCTION

Dans le but de quantifier l'apport des renforcements, en terme de caractéristiques intrinsèques d'un sol, nous avons, dans notre travail, analysé théoriquement et expérimentalement un échantillon de sable renforcé par des lits géosynthétiques en faisant varier le nombre et le type de nappes.

Le principe de renforcement des sols repose sur l'introduction dans le sol des structures appelées inclusions. Dans un sol renforcé, les propriétés mécaniques du sol initial, qui le plus souvent ne possède pas de résistance à la traction, se trouvent améliorées par la mise en place d'inclusions.

Les géotextiles sont des matériaux obtenus par entrecroisement de deux séries de fils ou bandelettes. Il existe différentes sortes de tissage qui permettent d'aboutir à une grande résistance à la rupture et à un module élevé. Ils présentent souvent une faible déformabilité (entre 10 et 25%). Ils peuvent agir sur le comportement mécanique des sols selon deux modes principaux d'action que sont la séparation et le renforcement.

L'action de renfort permet soit de réduire et homogénéiser la déformabilité notamment en répartissant la charge et en évitant les risques de poinçonnement, soit d'augmenter la résistance à la rupture de l'ouvrage.

## 2 - LE RENFORCEMENT DE SOL

Dans un sol renforcé, les propriétés mécaniques du sol initial, qui le plus souvent ne possède pas de résistance à la traction, se trouvent améliorées par la mise en place d'inclusions.

Pour tous les composites, l'interaction entre leurs différents éléments est essentielle pour permettre notamment une bonne transmission des contraintes.

Introduire des inclusions dans un sol, c'est modifier son comportement, celui-ci peut se traduire par une augmentation des caractéristiques intrinsèques de ce sol, et qui proviennent essentiellement du frottement des grains du sol sur les inclusions.

Les facteurs liés à l'inclusion sont:

- L'état de surface
- Caractéristiques mécaniques de l'inclusion

Les facteurs liés au sol sont:

- Granulométrie
- Densité du sol

Les facteurs liés à l'association sol/inclusion sont:

- Le comportement à l'interface sol-inclusion qui est caractérisé par deux types d'essais :
- Frottement à l'interface.
- Coefficient de frottement.

## 3 - MATERIAUX DE L'ETUDE

**Matériau Sol :** Le matériau sol utilisé est un sable 0/5 à granulométrie serrée, et de teneur en eau nulle. Il est supposé régi par le critère de Mohr Coulomb.

- La densité  $\gamma_d = 1.60 \text{ t/m}^3$

### Matériau de renforcement

Le matériau de renforcement est un géotextile de différents types. Nous avons utilisé pour nos essais trois types de géotextiles:

1<sup>er</sup> matériau : géotextile Hatelit C40/17,

Sa résistance en traction est de 50 KN/ml.

Son allongement à la rupture est de 12%.

2<sup>ème</sup> matériau : géotextile stabilinka 200,

Sa résistance en traction est de 200 KN/ml

Son allongement à la rupture est de 7%

3<sup>ème</sup> matériau : géotextile BATISTE, c'est des textiles tissés très fin fabriqués par la Société de Draa Ben Khedda (W. Tizi-Ouzou)

Sa résistance en traction est de 70KN/ml

Son allongement à la rupture est de 8%

## 4 - CONDITIONS DES ESSAIS

Les essais sont réalisés à l'aide d'un appareil de cisaillement triaxial grand modèle sur un sable renforcé par des nappes géosynthétiques disposés sous forme de lits horizontaux.

L'essai triaxial permet de déterminer les caractéristiques mécaniques globales du composite sol-renfort. La connaissance des paramètres  $C$  et  $\varphi$  est indispensable pour le calcul de la stabilité d'un ouvrage de sol renforcé.

L'objectif de ces essais, est de voir l'évolution de ces paramètres en fonction des différentes dispositions des armatures ainsi que de leur quantité.

## 5 - CARACTERISATION DU COMPOSITE SOL/ GÉOTEXTILES

Les essais expérimentaux ont pour but de déterminer l'évolution des caractéristiques mécaniques d'un sol renforcé.

Conditions de l'essai :

Les conditions pour effectuer les essais sont les suivants :

- ◆ Dimensions de l'échantillon :
  - Hauteur :  $H = 14 \text{ cm}$
  - Diamètre :  $D = 7,5 \text{ cm}$
- ◆ Densité de sable :  $\gamma_d = 1,60 \text{ t/m}^3$
- ◆ Vitesse de chargement :  $V = 1 \text{ mm/min}$
- ◆ Contraintes latérales = de Confinement = Forces Hydrostatiques:
  - $\sigma_3 = 1,0 - 1,5 - 2,0 \text{ bars}$

Ces conditions sont les mêmes pour l'ensemble des essais réalisés.

## 6 - COURBE DE LA VARIATION DE LA COHÉSION EN FONCTION DU NOMBRE DE RENFORCEMENT

On constate que l'évolution de la courbe «nombre de renforcement/cohésion» (figure 1.00) est une droite qui passe par l'origine, et nous remarquons que chaque fois qu'on ajoute un renforcement, la cohésion augmente uniformément suivant la formule définie par :

$$C_N N = N \operatorname{tg} \alpha + C_0$$

N : nombre de renforcement.

$C_N$  : cohésion correspond à N nombre de renforcement.

$\alpha$  : l'angle d'inclinaison de la courbe F(C, N).

( $\alpha = 17,45^\circ$ ,  $C_0 = 0$ )

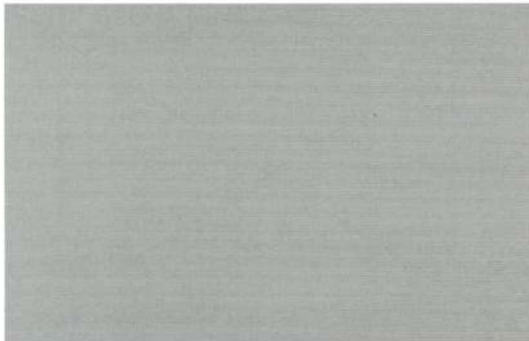


Fig.1.00 - Courbe Cohésion/Nombre de renforcement

## 7 - INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

On note une augmentation de la cohésion qui passe de  $C = 0$  bar pour le cas du sable non renforcé à une cohésion de  $C = 0,3$  bars (Tableau 1.01) dans cas du sable renforcé avec une nappe de Hatelit C40/17 à une cohésion  $C = 0,6$  bars dans le cas d'un sable renforcé par deux nappes de Hatelit C40/17. Le sable renforcé par une nappe de **stabilinka 200** donne une cohésion plus élevée comparé à celui renforcé par une nappe de Hatelit C40/17. Cette différence est due à la valeur de la résistance en traction du **Stabilinka 200** qui est nettement plus importante.

Le sable renforcé par une nappe de **Batiste** donne une cohésion de  $0,4$  Par contre, l'angle de frottement interne est de  $40^\circ$ . Les résultats sont résumés dans le tableau 1.01 suivant :

	Sable non renforcé	Sable renforcé par			
		une nappe de Hatelit C40/17	deux nappes de Hatelit C40/17	une nappe Stabilinka	une nappe Batiste
Cohésion C (bars)	0	0,3	0,6	0,5	0,4
L'angle de frottement interne $\phi$	$41^\circ$	$42^\circ$	$41^\circ$	$40^\circ$	$40^\circ$

Tableau 1.01 - Résultat des essais

On remarque, d'après les courbes (Contrainte/déformation)(Tableau 1.02), que la déformation à la rupture évolue suivant le nombre et le type de renforcement, elle passe de  $5,25\%$  pour un sable non renforcé à  $6\%$  pour le sable renforcé par une nappe et à  $6,5\%$  pour l'échantillon renforcé par 2 nappes.

	C (bars)	Sable renforcé par			
		une nappe de Hatelit C40/17	une nappe de Hatelit C40/17	une nappe de Stabilinka 200	une nappe de Batiste
Résultats théoriques		0,302	0,587	0,492	0,401
	$\phi(^\circ)$	42	41	40	40
Résultats	C(bars)	0,3	0,6	0,5	0,52
Expérimentaux	$\phi(^\circ)$	42	41	40	40

Tableau 1.02 : Evolution des Contraintes et Déformation

## 8 - CONCLUSION

Les études menées sur les échantillons de sable renforcés par des nappes géosynthétiques, disposées horizontalement, ont montré que ce type de renforcement améliore les caractéristiques intrinsèques du sable et augmente sa résistance à la rupture.

Cette amélioration est liée directement à la résistance en traction des nappes de renforcement et à la résistance de l'interface sol-renfort. L'étude expérimentale basée sur les essais de cisaillement à l'appareil triaxial grand modèle a permis de mettre en évidence l'apparition d'une pseudo-cohésion due à la présence, dans l'échantillon de sable, des nappes géosynthétiques, tandis que l'angle de frottement interne a conservé, en moyenne, une valeur sensiblement égale à celui du sable non renforcé.

## 9 - ANALYSE DES RÉSULTATS

### Mode de rupture des l'échantillon

#### a. Sable non renforcé :

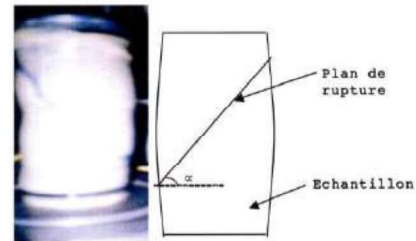


Figure 1.01 : Représentation plan de rupture

#### b. Sable renforcé par deux nappes de Hatelit C40/17 :

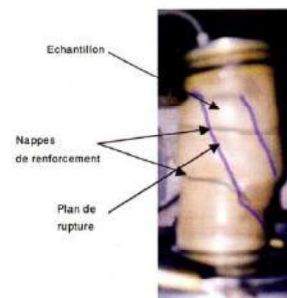


Photo 1.02 : échantillon renforcé par deux nappes «après rupture»



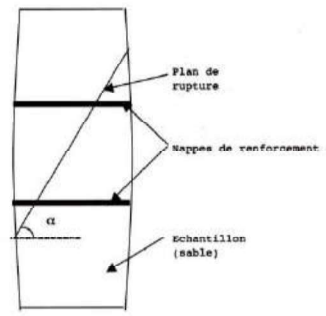
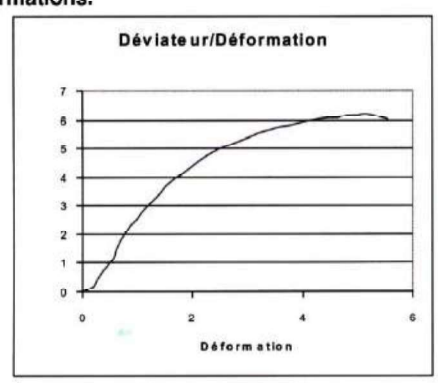
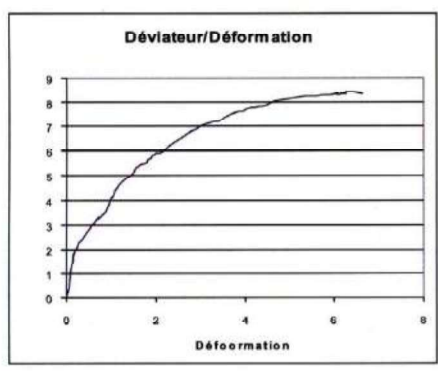


Figure 1.03: Représentation plan de rupture - Evolution du déviateur de contrainte en fonction des déformations.



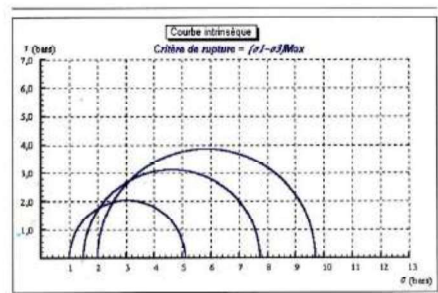
Sable non renforcé



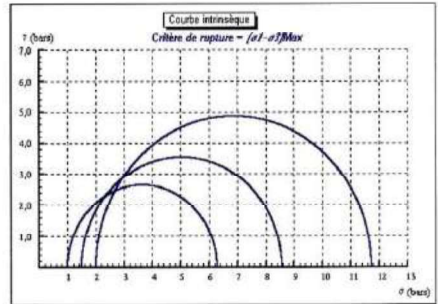
Sable renforcé par deux nappes de Hatelit C40/17  
Graphe 01 : Courbe Déviateur /Déformation

**Evolution de contrainte de cisaillement en fonction de la contrainte normale :**

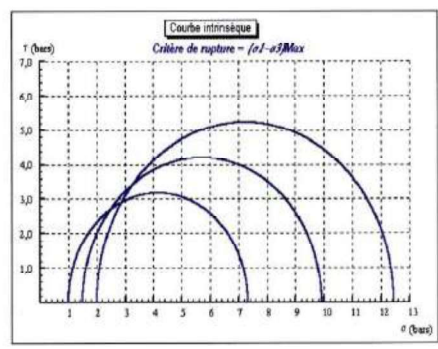
Dans cette évolution on peut tracer la courbe intrinsèque, qui détermine l'angle de frottement et la cohésion. Cette courbe est représentée par le critère de Mohr :  $\tau = \sigma \tan \varphi + C$ .  
 a-sable non renforcé : On remarque que la courbe intrinsèque (Graphe 02) est une droite de forme :  $A = Bx + C$   
 En comparant avec le critère de Mohr, on trouve que :  
 - La cohésion :  $C = 0$  bars  
 - L'angle de frottement interne :  $\varphi = 41^\circ$



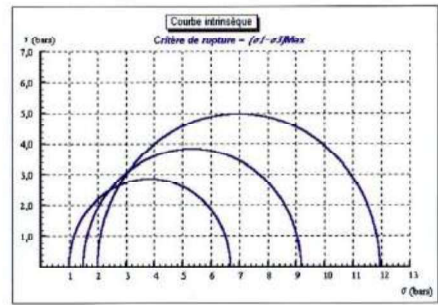
Graphe N° 02 : Courbe Intrinsèque (Sable non renforcé)



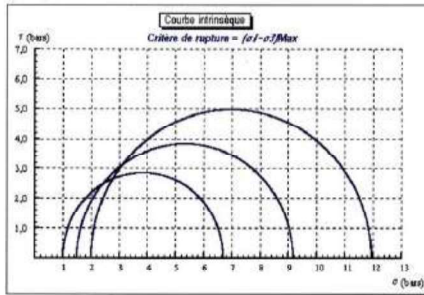
Graphe N°03 : Courbe Intrinsèque (Sable renforcé avec une nappe Hatelit)



Graphe N° 04 : Courbe Intrinsèque (Sable renforcé avec deux nappes de Hatelit)



Graphe N° 05 : Courbe Intrinsèque (Sable renforcé avec une nappe de Stabilinka 200)



Graphique N° 06 : Courbe Intrinsèque (Sable renforcé avec une nappe de Batiste)

10. ETUDE THEORIQUE DE L'EVOLUTION DE LA COHESION

1. Application à l'essai de cisaillement Triaxial

En se basant sur la théorie de la méthode d'homogénéisation, nous avons tenté dans ce paragraphe d'appliquer les résultats de cette méthode à notre cas, à savoir l'essai de cisaillement triaxial pour un sable renforcé.

Les équations du critère de Mohr Coulomb (figure 1.03) en contrainte macroscopique sont données par :

$$\sigma_n = \frac{\Sigma_1 + \Sigma_2}{2} + \frac{\Sigma_1 - \Sigma_2}{2} \cos 2\alpha$$

$$\tau = \frac{\Sigma_1 - \Sigma_2}{2} \sin 2\alpha$$

Et  $\Sigma_1 = K_p \Sigma_2$  (3)

Avec  $K_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$

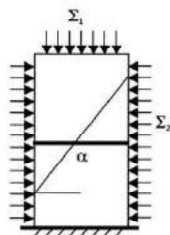


Figure 1.03

D'après l'équation (\*) le critère de Mohr coulomb s'écrit :

$$\Sigma_1 = \sigma_n + \tau \left( \frac{1 + \sin \phi}{\cos \phi} \right) \quad (1)$$

$$\Sigma_2 = \sigma_n - \tau \left( \frac{1 - \sin \phi}{\cos \phi} \right) \quad (2)$$

En remplaçant (1) et (2) dans (3) on aura :

$$\tau = A \sigma_n + \frac{1}{2} \frac{\cos \phi}{(1 - \sin \phi)}$$

Avec :

- A : expression trigonométrique en fonction de phi.
- Kp : coefficient de poussé passive.

Par approximation du composite comme un milieu frottant isotrope.

1/ le critère définissant le domaine isotrope :

$$\sigma_1(1 - \sin \phi) - \sigma_2(1 + \sin \phi) - 2C \cos \phi \leq 0 \quad (1)$$

2/ le critère s'écrit en fonction de Sigma\_1, Sigma\_2 et sigma\_n :

$$(\Sigma_1 - \Sigma_2) - (\Sigma_1 + \Sigma_2) \sin \phi - (1 + \sin \phi) \sigma \leq 0 \quad (2)$$

Par identification, entre (1) et (2), la cohésion isotrope aura comme valeur :

$$C = \frac{1}{2} \cdot \frac{(1 + \sin \phi)}{\cos \phi} \times \sigma \text{ ou } C = \frac{1}{2} \cdot \frac{\cos \phi}{(1 - \sin \phi)} \times \sigma$$

2. Application Numérique

D'après la théorie d'homogénéisation on trouve que la cohésion s'écrit en fonction de C et phi de la façon suivante :

$$\sigma = F/S \quad C = \frac{1}{2} [(1 + \sin \phi) / \cos \phi] \times \sigma$$

F : la résistance à la traction du géotextile.

S : la section de l'échantillon, S = H x 1 (ml).

2.1. Sable renforcé avec une nappe Hatelit C40/17

Les résultats par l'application de la théorie d'homogénéisation sont :

On a : phi = 42°

sigma = F/S (kN/ml)

Avec F = 50 kN/ml

S = 0,14 x 1 = 0,14 m2.

==> sigma = 50/0,14 = 357,14 kN/m2/ml

On a sigma = 357,17 x 0,075 = 26,78 kN/m2

On trouve :

$$C = \frac{1}{2} [(1 + \sin 42) / \cos 42] \times 26,78 = 30,21 \text{ kN} = 0,302 \text{ Bar}$$

$$C = 0,302 \text{ Bars}$$

2.2. Sable renforcé avec deux nappes Hatelit C40/17

Les résultats par l'application de la théorie d'homogénéisation sont :

On a : phi = 41°

sigma = 2F/S (kN/ml)

Avec F = 50 kN/ml

S = 0,14 x 1 = 0,14 m2.

==> sigma = 2(50/0,14) = 714,28 kN/m2/ml

On a sigma = 714,34 x 0,075 = 53,571 kN/m2

On trouve que :

$$C = \frac{1}{2} [(1 + \sin 41) / \cos 41] \times 53,575 = 58,77 \text{ KN} = 0,5877 \text{ Bar}$$

$$C = 0,587 \text{ bars}$$

2.3. Sable renforcé avec une nappe stabilinka 200

Les résultats par l'application de la théorie d'homogénéisation sont :

On a : phi = 40°

Avec F = 200 kN/ml pour un allongement de 7%.

Pour notre essai le renforcement a subit un allongement de 3% ce



qui donne une résistance à la traction d'après le graphe N°01 :  
égale à

$$F = 85,71 \text{ kN/ml}$$

$$S = 0,14 \times 1 = 0,14 \text{ m}^2$$

$$\Rightarrow \sigma = (85,71/0,14) = 612,245 \text{ kN/m}^2/\text{ml}$$

$$\text{On a } \sigma = 612,245 \times 0,075 = 45,918 \text{ kN/m}^2$$

On trouve que :

$$C = \frac{1}{2} [(1+\sin 40)/\cos 40] \times 45,918 = 49,23 \text{ kN} = 0,492 \text{ B}$$

$$C = 0,492 \text{ Bars}$$

### 2. 4. Sable renforcé avec une nappe Batiste 55

Les résultats par l'application de la théorie d'homogénéisation sont :

$$\text{On a : } \phi = 40^\circ$$

$$\sigma = F/S \text{ (kN/ml)}$$

$$S = 0,14 \times 1 = 0,14 \text{ m}^2$$

$$\Rightarrow \sigma = (70/0,14) = 500,00 \text{ kN/m}^2/\text{ml}$$

$$\text{On a } \sigma = 500,00 \times 0,075 = 37,50 \text{ kN/m}^2$$

On trouve que :

$$C = \frac{1}{2} [(1+\sin 40)/\cos 40] \times 37,50 = 40,125 \text{ kN} = 0,401 \text{ B}$$

$$C = 0,401 \text{ Bars}$$

### 3. Interprétation des résultats

On remarque une augmentation de cohésion qui passe de C= 0.3 bars dans le sable renforcé avec une nappe de Hatelit C40/17, à une valeur = 0.6 bars dans un sable renforcé avec deux nappes de Hatelit C40/17 (Tableau 1.03), et qui augmente aussi pour un sable renforcé par une nappe de Stabilinka 200 car sa résistance à la traction est plus élevée que la résistance du renforcement Hatelit C40/17.

Nous résumons dans le tableau 1.03. L'ensemble des résultats obtenus :

	une nappe de Hatelit C40/17	deux nappes de Hatelit C40/17	une nappe de Stabilinka 200	une nappe de Batiste 45
Cohésion C (bars)	0,302	0,588	0,492	0,401

Tableau 1.03

### 11. COMPARAISON ENTRE LES RESULTATS THEORIQUES ET EXPERIMENTAUX

Nous résumons dans le tableau 1.04 les résultats théoriques obtenus à partir de la méthode d'homogénéisation, et expérimentaux obtenus par des essais effectués sur le sable renforcé.

		Sable renforcé par			
		une nappe de Hatelit C40/17	une nappe de Hatelit C40/17	une nappe de Stabilinka 200	une nappe de Batiste
Résultats théoriques	C (bars)	0,302	0,587	0,492	0,401
	$\phi$ (°)	42	41	40	40
Résultats Expérimentaux	C(bars)	0,3	0,6	0,5	0,52
	$\phi$ (°)	42	41	40	40

Tableau 3.04 : Les Résultats Théoriques Et Expérimentaux

### 12. CONCLUSION GENERALE

Les études menées sur les échantillons de sable renforcés par des nappes géosynthétiques, disposées horizontalement, ont montré que ce type de renforcement améliore les caractéristiques intrinsèques du sable et augmente sa résistance à la rupture.

Cette amélioration est liée directement à la résistance en traction des nappes de renforcement et à la résistance de l'interface sol-renfort.

L'étude expérimentale basée sur les essais de cisaillement à l'appareil triaxial et l'approche théorique par la méthode d'homogénéisation à la rupture ont permis de mettre en évidence l'apparition d'une pseudo-cohésion due à la présence, dans l'échantillon de sable, des nappes géosynthétiques, tandis que l'angle de frottement interne a conservé, en moyenne, une valeur sensiblement égale à celui du sable non renforcé.

L'approche théorique a permis de donner une expression du gain maximum en cohésion anisotrope à la rupture de l'échantillon de sable renforcé. L'application de cette expression à nos cas a montré que la pseudo-cohésion théorique concorde avec celle mesurée expérimentalement.

Enfin, d'étude expérimentale a montré que la valeur du déviateur de contraintes à la rupture augmente en fonction du nombre de nappes géosynthétiques incorporées dans l'échantillon de sable.

### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BACOT J. (1981).

«Contribution à l'étude du frottement entre une inclusion et un matériau pulvérulent : cas de la terre armée». Thèse d'Etat, INSA et Univ. Lyon 1.

COLLIOS A. (1981).

«Lois d'interaction sol - géotextile». Thèse de Doct. Ing., IRIGM Grenoble.

DALI B. (1989)

GUILLOUX A., SCHLOSSER F., LONG N. T. (1979)

«Etude du frottement sable - armature en laboratoire». Coll. Int. Renforcement des sols. Paris. Vol 1, p. 35 - 40.

« Coll. Int. Sur le renforcement des sols. Vol. 1.

MESSAS T. (1997)

«Etude des renforcements des sols par nappes discontinues en matières plastiques souples» Thèse de doctorat : Université Claude Bernard, Lyon 1. ENPC, Paris.

TAKI M., AZZOUZ R., COULET C., HAMELIN P. (1999).

«Modélisation théorico-expérimentale d'un sol renforcé par des déchets en matières plastiques : Application au procédé Plasterre». Renc. Géosynthétiques, 12 et 13 oct., Bordeaux. Vol 2, pp 191 - 198. Déviat