

DELMAS P. et GOURC J.P.

Institut de Recherches Interdisciplinaires de Géologie et de Mécanique, France

GIROUD J.P.

WOODWARD-CLYDE Consultants, U.S.A.

Analyse expérimentale de l'interaction mécanique sol-géotextile**Experimental analysis of soil-geotextile interaction**

Geotextiles can be used as reinforcements in earth masses. Because of their flexibility and deformability, their range of utilization is different from the one of metallic reinforcements. In order to study the properties of geotextiles as reinforcements, a testing equipment has been specially built. It consists of a large shear box (250 mm x 400 mm) designed for both friction tests and pull-out tests :

- . in friction tests, a layer of soil, placed on a geotextile, is submitted to horizontal displacements, while the geotextile remains attached to the supporting medium (which is either a layer of soil or a rigid plate)
- . in pull-out tests, the geotextile, which is submitted to a tensile force, moves between two layers of soil; in this case the measurement of the elongation of the geotextile during the test allows the determination of the distribution of tangential stresses at the contact soil-geotextile.

Test results are presented as a function of the soil (mainly characterized by the size and the shape of its particles), the type of geotextile (woven or non woven), and the type of test (friction or pull-out). These results are compared with a theoretical analysis and it appears that the mechanism of soil-geotextile interaction is different in the two types of tests.

1 INTRODUCTION**1.1 But de cette étude**

L'utilisation de géotextiles comme renforcement d'ouvrages en terre (remblais, pistes, ...) passe par la connaissance de leur propriétés. Leur souplesse en flexion, leur déformabilité en traction et accessoirement leur perméabilité les prédisposent à une utilisation différente des armatures métalliques. Nous avons étudié l'interaction mécanique sol-géotextile à l'aide d'un appareil de frottement et traction construit à l'IRIGM.

1.2 Cinématique sol-géotextile

Considérons un géotextile placé entre deux sols. Pour simplifier l'exposé nous supposons que le géotextile est horizontal, et nous appellerons "support" le sol inférieur et "couverture" le sol supérieur. Compte tenu des déformabilités relatives du sol et du géotextile, la cinématique peut varier d'un point à un autre. En un point donné, la situation la plus générale est que couverture, géotextile et support aient des déplacements différents. Pour simplifier l'étude expérimentale on peut considérer que ce cas général résulte de la combinaison de deux cas particuliers :

- . Cas A : les deux couches de sol se déplacent l'une par rapport à l'autre et le géotextile est solidaire de l'une d'elles (le support, par exemple);
- . Cas B : le géotextile, soumis à un effort de traction, se déplace entre deux couches de sol fixes l'une par rapport à l'autre. Ces deux mécanismes, A et B, sont étudiés respectivement par l'essai de frottement et l'essai de traction (Fig. 1).

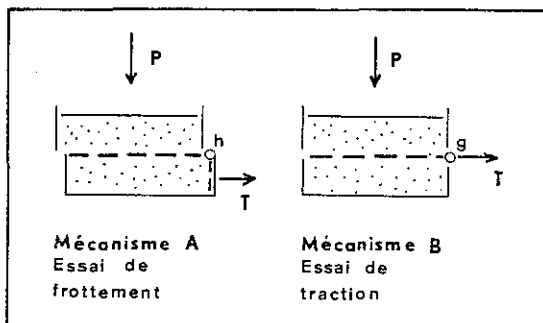


Fig. 1. Les deux types d'essais effectués.

1.3 Matériel expérimental

L'appareil est conçu suivant le principe d'une boîte de cisaillement (Fig. 1, 2, 3) dont les dimensions (longueur dans le sens du déplacement : 400 mm; largeur : 250 mm; hauteur : 2 x 100 mm) permettent d'utiliser des sols à grosse granulométrie et de diminuer certains effets d'échelle. Dans l'essai de frottement, le géotextile est lié au demi-boîtier inférieur au point h et dans l'essai de traction il est tiré au point g, les deux couches de sol étant maintenues immobiles. Les valeurs maximales de la force normale P et de la force de traction T (Fig. 1) sont de 30 000 N. Les essais sont effectués à la vitesse constante de 0,1 mm/s (vitesse des points h et g de la Figure 1). Dans l'essai de frottement, le déplacement maximal est de 100 mm.

Afin de pouvoir considérer le problème comme bidimensionnel, nous empêchons les déformations de striction du géotextile sous tension par deux rangées d'aiguilles s'appuyant sur les bords des boîtiers.

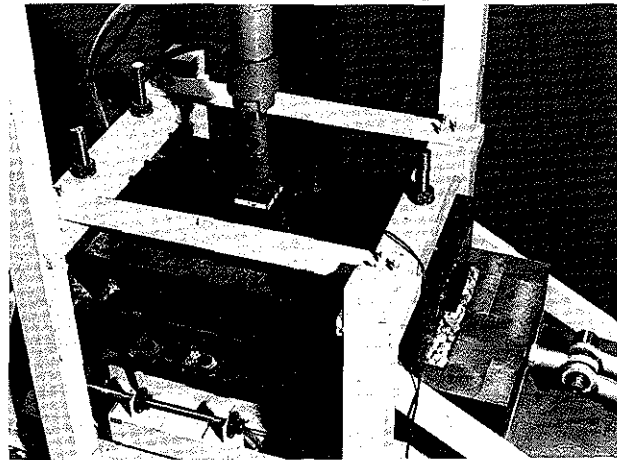


Fig. 2. Essai avec déplacement relatif des deux demi-boîtiers (cisaillement effectué sur la gravette concassée). Voir Table 1).

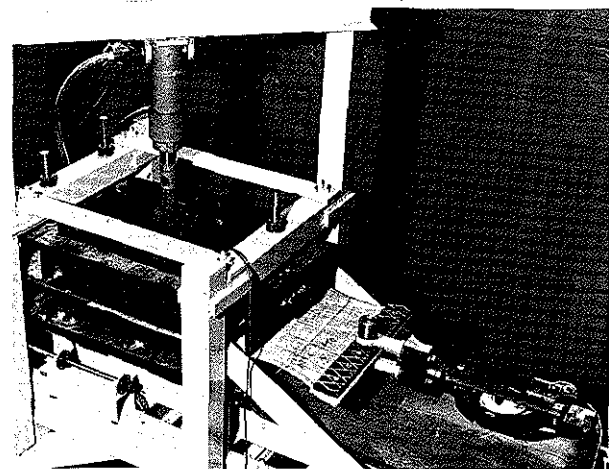


Fig. 3. Essai sans déplacement relatif des deux demi-boîtiers : essai de traction sur géotextile.

1.4 Matériaux utilisés

1.4.1. Sols de couverture

On utilise plusieurs types de sol pulvérulent (Table 1) et un type de sol cohérent (Table 2) dont les propriétés ont été mesurées par des essais de cisaillement (Fig. 2) effectués dans les mêmes conditions (vitesse, épaisseur de sol) que les essais de frottement ultérieurs avec géotextile.

1.4.2. Support

On utilise soit les mêmes matériaux que pour la couverture, soit une plaque rigide qui peut être ou bien lisse (acier inoxydable poli) ou bien parfaitement adhérente (collée au géotextile).

Sol	Sable	Gravette roulée	Gravette concassée	Ballast
granulométrie (mm)	0,08 à 5	5 à 20	5 à 20	20 à 40
masse volumique (kg/m ³)	1690	1500	1450	1460
ϕ (degré)	35	47	48	63
1/2 épaisseur de sol (cm)	2	5	5	9

Table 1 : Caractéristiques des sols pulvérulents utilisés

Sol	masse volumique ρ_a (kg/m ³)	teneur en eau W (%)	limites d'Atterberg		cohésion et frottement	
			w_L (%)	w_p (%)	c (kN/m ²)	ϕ
argile de poterie	1500	29	35,5	22,5	25	0

Table 2 : Caractéristiques du sol cohérent utilisé

1.4.3. Géotextiles

Nous avons testé différents géotextiles (Table 3). Les valeurs du module de déformation K, et de la résistance à la traction, R_T , sont celles relatives à un essai de traction sans striction et pour des vitesses d'essai de l'ordre de grandeur de celle utilisée ici (0,1 mm/s). Ces valeurs ne sont qu'un ordre de grandeur moyen tiré de divers essais approximatifs.

Géotextile	K (kN/m)	R_T (kN/m)
non-tissé Bidim U14 (NT 100)	14	11
non-tissé Bidim U44 (NT 400)	40	20
non-tissé Bidim U64 (NT 600)	68	35
tissé tri X 420TS26 (TX)	114	32

Table 3 : Caractéristiques des géotextiles utilisés

2 ESSAIS DE FROTTEMENT

Le principe de ces essais est le suivant. L'effort vertical, P, étant maintenu constant, on mesure la variation de l'effort horizontal, T, en fonction du déplacement, u, du demi-boîtier inférieur. Les courbes obtenues ont, schématiquement, l'allure indiquée sur la figure 4.

On interprète ces essais en déterminant l'adhérence sol-géotextile, θ , et l'angle de frottement sol-géotextile, φ , à l'aide de la

loi de Coulomb : (1) $T_{\max} = C \cdot S + P \cdot \text{tg} \varphi$
 (T_{\max} : valeur maximale de T ; S : surface de contact géotextile/couverture, qui diminue lorsque u augmente).

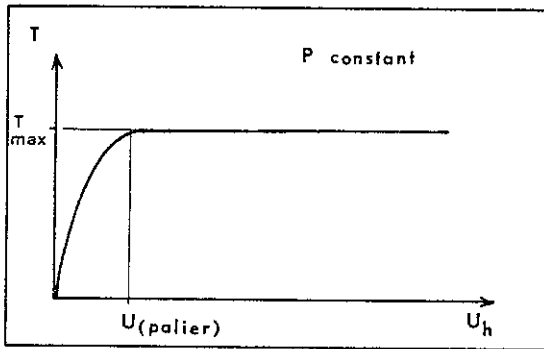


Fig. 4. Allure schématique des courbes d'essais de frottement donnant l'effort horizontal, T , en fonction du déplacement du point h (Fig. 1).

2.1. Support rigide

Le support est lisse ou parfaitement adhérent (voir 1.3.2). On constate, dans la Table 4, que la "qualité du contact" géotextile-sol de couverture, exprimée par C/c ou φ/ϕ , augmente lorsque l'angularité des particules de sol augmente (concassées/roulées) et lorsque leur dimension diminue (du ballast à l'argile).

Si le support est lisse, le géotextile est tendu. En comparant ce cas à celui du support adhérent, on évalue l'influence sur φ de l'élongation du géotextile dans son plan. Avec sable ou gravette roulée, φ n'est pas affecté par la tension du géotextile. Mais, avec la gravette concassée, φ est plus faible lorsque le support est lisse : on peut penser que l'élongation du géotextile favorise alors un réarrangement des grains (notons $U_h = 20$ mm adhérent $U_h = 55$ mm lisse; palier)

2.2. Support sol cohérent (Table 4)

Pour un élément ℓ de géotextile en glissement, la composante tangentielle du frottement géotextile-sol granulaire de couverture est :

$$(2) \quad c_c \cdot \ell = \sigma_z \cdot \text{tg} \varphi \cdot \ell$$

La résistance maximale du support argileux est :

$$(3) \quad c_s \cdot \ell = C \cdot \ell$$

pour σ_z minimum = 50 kN/m² $C = 25$ kN/m²
 $C \cdot \text{tg} \varphi \cdot \ell > C \cdot \ell$ pour $\varphi > 26^\circ 5'$

Le géotextile restera donc dans la plupart des cas solidaire du sol de couverture granulaire et glissera sur le support cohérent. La faible cohésion de l'argile ne peut donc empêcher l'élongation du géotextile et sa mise en tension. Il en résulte une augmentation de la raideur du géotextile qui empêche le poinçonnement du sol support. On constate effectivement qu'en fin d'essai la surface de l'argile est plane. Il est donc logique que ces résultats soient voisins de ceux relatifs au support lisse.

Sol de "couverture" →	Argile	Sable	Gravette roulée	Gravette concassée	Ballast
couverture $\left\{ \begin{array}{l} c \text{ [kN/m}^2\text{]} \\ \phi \text{ (d}^\circ\text{)} \end{array} \right.$	25 0	0 35	0 47	0 48	0 63
NT 400 + support adhérent $\left\{ \begin{array}{l} C \text{ kN/m}^2 \\ \varphi \text{ (d}^\circ\text{)} \\ C/c \text{ ou } \varphi/\phi \end{array} \right.$	25 0 1	0 32 0,91	0 24 0,51	0 43 0,90	0 43 0,68
NT 400 + support lisse $\left\{ \begin{array}{l} C \text{ [kN/m}^2\text{]} \\ \varphi \text{ (d}^\circ\text{)} \end{array} \right.$	x x	0 32	0 23	0 38	x x
NT 400 + Support argileux $\left\{ \begin{array}{l} C \text{ [kN/m}^2\text{]} \\ \varphi \text{ [d}^\circ\text{]} \end{array} \right.$	x x	x x	0 21	0 38	x x

Table 4 : Valeurs comparées, pour différents sols de couverture, de C, φ obtenues en essais de frottement sur différents supports, et de c, ϕ caractéristiques intrinsèques du sol de couverture.

2.3. Support sol granulaire

2.3.1. Rôle de l'angularité du sol support
 On voit sur la figure 5 qu'en général le support en gravette roulée se traduit par des valeurs de φ plutôt faibles. On constate en fait que la gravette roulée est le seul support granulaire dont le géotextile ne reste pas solidaire lors de l'essai de frottement. Etant tendu, le géotextile n'épouse pas la forme du support et se comporte comme un "plan de glissement" (Fig. 6).

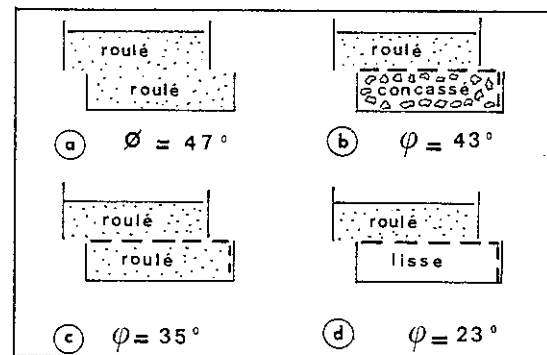


Fig. 6. Essais avec gravette roulée comme sol de couverture : (a) essai de cisaillement (sans géotextile); (b, c, d) essais de frottement (avec géotextile) : on voit la relation de φ avec le relief de la surface.

2.3.2. Rôle de la granulométrie du sol support.

Deux cas sont à considérer (Fig. 5). Si le sol de couverture est fin et anguleux (sable, gravette concassée), la "qualité" du contact est excellente (φ/ϕ voisin de 1) et la granulométrie du sol support granulaire n'intervient pas de façon sensible. Si le sol de couverture est arrondi (gravette roulée) ou très gros (ballast), la "qualité du contact" n'est pas parfaite : φ/ϕ est de l'ordre de 0.7 - 0.8 mais a tendance à augmenter lorsque la granulométrie du sol support augmente.

2.3.3. Rôle de l'effort normal

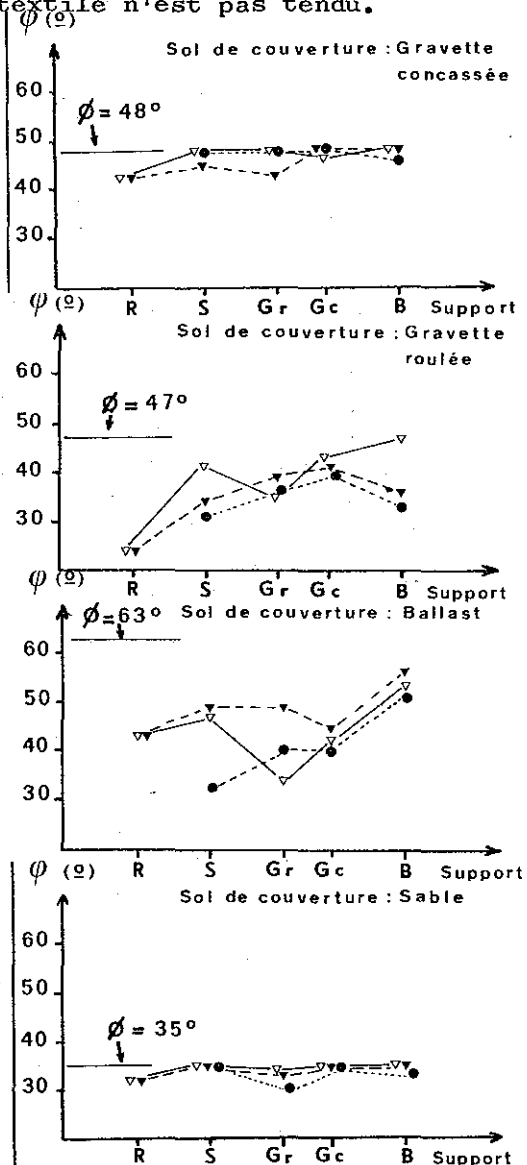
Au début du § 2, nous avons supposé que la relation entre T_{\max} et P était linéaire (loi de Coulomb). En fait, dans certains cas, l'angle φ augmente lorsque σ_z augmente jusqu'à une valeur σ_p (σ_z est la contrainte normale moyenne sur le géotextile définie par

$\bar{\sigma}_z = P/S$, P étant l'effort normal et S la surface de contact) (Fig. 7).

On peut caractériser cette augmentation de φ par : $\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0$

(φ étant conventionnellement mesuré à $\bar{\sigma}_z = 150 \text{ kN/m}^2$ et φ_0 étant la valeur de φ pour $\bar{\sigma}_z = 0$, valeur qu'il est logique de supposer égale à la valeur de φ mesurée sur support parfaitement adhérent).

Lorsque $\bar{\sigma}_z$ augmente, le géotextile épouse mieux la forme du support granulaire (Fig. 8). mais ceci ne se produit que si le géotextile n'est pas tendu.



Légende : R "support" rigide parfaitement adhérent
 S "support" sable
 Gr "support" gravette roulée
 Gc "support" gravette concassée
 B "support" ballast

▽-▽ géotextile NT100
 ▼-▼ géotextile NT600
 ●-● géotextile TX

Fig. 5. Résultats des essais de frottement. ϕ : angle de frottement interne du sol de couverture; φ géotextile-sol de couverture.

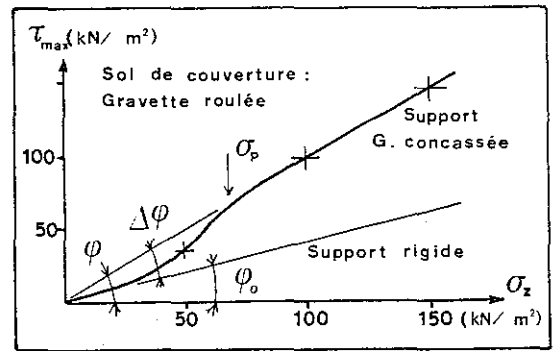


Fig. 7. Courbe donnant la contrainte tangentielle, $\bar{\tau}_{max}$, en fonction de la contrainte normale, $\bar{\sigma}_z$, dans un essai de frottement sur un géotextile NT400

La valeur de $\bar{\sigma}_p$ est donc faible ($\bar{\sigma}_p < 50 \text{ kN/m}^2$ pour le NT 100) et élevée lorsque le géotextile est tendu soit parce que son module est très élevé ($\bar{\sigma}_p > 150 \text{ kN/m}^2$ pour le TX) soit parce que le module est assez élevé et le support peu rugueux ($\bar{\sigma}_p > 150 \text{ kN/m}^2$ pour le NT 600 sur gravette roulée)



Fig. 8. Aspect du géotextile épousant son support.

3 ESSAIS DE TRACTION

Le principe de ces essais est le suivant. L'effort vertical, P, étant maintenu constant, on exerce un effort de traction T au point g du géotextile (Fig. 1). Les courbes donnant T en fonction du déplacement u_g du point g ont schématiquement l'allure indiquée sur la Figure 9.

On interprète ces essais en déterminant l'angle de frottement sol-géotextile, φ^* et l'adhérence sol-géotextile, \bar{c}^* , d'après la loi de Coulomb :

$$(4) \quad \bar{\tau}_{max} = \bar{c}^* + \bar{\sigma}_z \cdot \text{tg} \varphi^*$$

($\bar{\tau}_{max} = T_{max}/2S$; $\bar{\sigma}_z = P/S$; S : surface de contact géotextile sol qui diminue lorsque u augmente).

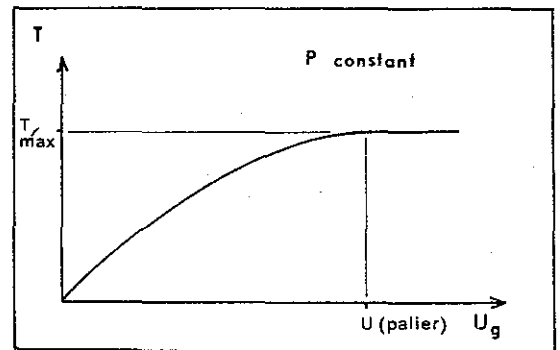


Fig. 9. Allure schématique des courbes d'essais de traction

Notons que, si la cinématique de l'essai de frottement autorisait à supposer que les contraintes $\hat{\sigma}_{\max}$ et $\hat{\sigma}_z$ étaient réparties à peu près uniformément sur l'ensemble du géotextile, ce n'est assurément pas le cas dans l'essai de traction. Les valeurs moyennes, $\bar{\sigma}_{\max}$ et $\bar{\sigma}_z$, ne sont utilisées ici que par commodité. La distribution de $\hat{\sigma}$ et $\hat{\sigma}_z$ fera plus loin (§ 3.3) l'objet d'une étude théorique.

Tous les essais de traction ont été faits avec un seul géotextile, le nontissé NT400.

3.1. Analyse du frottement et de l'adhérence

3.1.1. Essais de traction dans un sol granulaire.

Dans tous ces essais, le support est identique à la couverture et le géotextile est le nontissé NT400. La valeur de l'angle de frottement, φ^* , ainsi obtenue, est comparée aux valeurs φ obtenues dans deux essais de frottement, l'un avec support lisse, φ_1 , l'autre avec support identique à la couverture, φ_2 (Table 5).

Le fait que φ^* soit voisin de φ_1 et inférieur à φ_2 indique que, dans l'essai de traction, le géotextile a une forme relativement plane. On en déduit que sa tension lui empêche d'épouser la forme des particules en contact.

Sol de couverture	Sable	Gravette roulée	Gravette concassée	Ballast
frottement [kN/m ²]	0	0	0	x
support lisse (d°) φ_1	32	23	38	x
traction $\hat{\sigma}$	0	0	0	0
support=couverture φ^*	33	23	33	(24) déchirure
frottement $\hat{\sigma}$	0	0	0	0
support=couverture φ_2	35	37	48	55

Table 5 : Valeurs comparées de $\hat{\sigma}$, φ (essai de frottement) et $\hat{\sigma}$, φ^* (essai de traction) pour différents sols granulaires.

3.1.2. Essais de traction sur un support cohérent.

Les résultats de la Table 6 se prêtent à une vérification simple: $T_{ca} \approx \frac{1}{2}(T_{aa} + T_{cc})$.

$$(5) \quad \hat{\sigma}_{ca}^* = \frac{1}{2}(\hat{\sigma}_{aa}^* + 0) \quad \text{et} \quad \text{tg} \varphi_{ca}^* = \frac{1}{2}(0 + \text{tg} \varphi_{cc}^*)$$

Couverture Support	Argile Argile $\rightarrow T_{aa}$	Sable Argile	Gravette concassée Argile $\rightarrow T_{ca}$	Concassée Concassée $\rightarrow T_{cc}$
[kN/m ²] $\hat{\sigma}$	$\hat{\sigma}_{aa}^* = 25$	10	$\hat{\sigma}_{ca}^* = 15$	0
(d°) φ^*	0	15	$\varphi_{ca}^* = 15$	$\varphi_{cc}^* = 33$

Table 6 : Valeurs de $\hat{\sigma}$, φ^* pour essais de traction. Interprétation du cas : sol de couverture différent du sol support.

3.2. Analyse de la cinématique

3.2.1. Déplacements différentiels du NT400

Les mesures présentées sur la Figure 10 sont relatives à un géotextile nontissé NT400 placé entre deux couches de sable sous une pression $\bar{\sigma}_z = 50 \text{ kN/m}^2$. Ces mesures ont été effectuées grâce à de fines tiges repères fixées

tous les 3 cm (aux points marqués de 1 à 10) et sortant à l'arrière de la boîte de cisaillement. Ces résultats seront utilisés dans l'étude théorique (§ 3.3).

3.2.2. Rôle de la longueur du géotextile

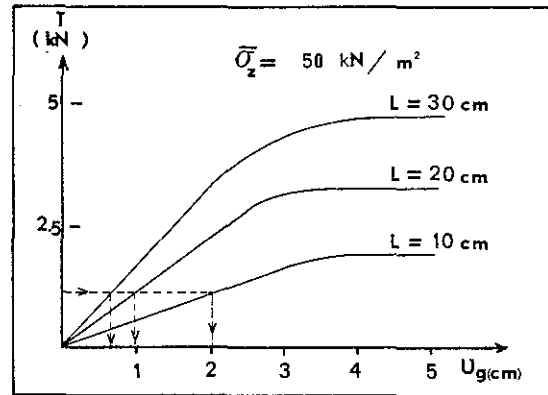


Fig. 11. Essais de traction correspondant à trois longueurs différentes de géotextile.

Un essai de traction a été effectué pour trois longueurs (10, 20 et 30 cm) de géotextile nontissé NT400 entre deux couches de sable, sous une pression $\bar{\sigma}_z = 50 \text{ kN/m}^2$ (Fig. 11). En examinant la partie ascendante des courbes on voit que, avant glissement d'ensemble du géotextile, la mobilisation d'un même effort, T, de traction nécessite un déplacement en tête, U_g , d'autant plus grand que la longueur du géotextile est faible. La longueur des armatures renforçant un massif de sol influe donc sur sa déformation.

3.3. Interprétation théorique de l'essai de traction

Expérimentons deux méthodes de calcul pour interpréter l'essai de traction dont les résultats sont donnés sur la Figure 10. Ces deux méthodes diffèrent par la distribution des contraintes au contact sol géotextile, mais, dans les deux cas, la même loi de contact sol-géotextile a été choisie. Cette loi est définie par les relations U_r (déplacement relatif sol-géotextile) - $\hat{\sigma}_{\max}$ - $\hat{\sigma}_z$. Sachant que le géotextile est tendu lors d'un essai de traction ce sont les relations $\hat{\sigma}$ - U_r et $\hat{\sigma}_{\max}$ - $\hat{\sigma}_z$ obtenues dans un essai de frottement sur support rigide adhérent qu'il faut retenir. En fait, pour simplifier les calculs, nous remplaçons la relation expérimentale $\hat{\sigma}$ - U_r par une courbe du type "rigide-plastique" (ce qui majore $\hat{\sigma}$, donc l'effort T) et nous supposons que la relation $\hat{\sigma}_{\max}$ - $\hat{\sigma}_z$ est linéaire ($\hat{\sigma}_{\max} = \hat{\sigma}_z \text{tg} \varphi$) (Fig. 12).

3.3.1. Méthode "α"

Nous supposons que $\hat{\sigma}_z$ est uniformément distribuée sur le géotextile. Il en résulte, d'après la loi de contact choisie, que $\hat{\sigma} = \hat{\sigma}_{\max}$ constant sur toute la portion ℓ de géotextile en déplacement (déterminée expérimentalement) et $\hat{\sigma} = 0$ sur toute la portion immobile du géotextile.

L'effort de traction T obtenu (courbe α sur la Figure 10) est beaucoup plus faible que la cour-

be expérimentale, alors qu'on aurait dû obtenir une majorante de la courbe expérimentale du fait de l'approximation sur la loi signalée plus haut. Nous allons voir que la méthode "β" est plus satisfaisante.

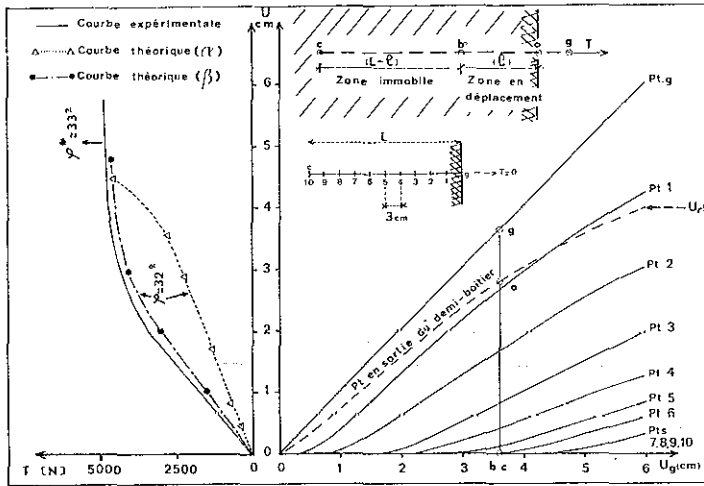


Fig. 10. Essai de traction d'un géotextile nantissé NT400 entre deux couches de sable ($\sigma_z = 50 \text{ kN/m}^2$). La partie droite représente le déplacement des points 1 à 10 (espacés de 3 cm) en fonction du déplacement du point 9 (par exemple, pour $U_9 = 3,6 \text{ cm}$, les points 6 à 10 n'ont pas bougé et la partie ag du géotextile a été tirée hors de la boîte).

3.3.2. Méthode "β"

Contrairement à la méthode "α", nous ne faisons pas ici d'hypothèse arbitraire sur la distribution de la contrainte σ_z normale au géotextile. Au contraire, nous écrivons l'équilibre du système de longueur ℓ_0 formé par le géotextile et une couche de sable d'épaisseur dz pour en déduire la distribution de σ_z , donc de τ (Fig. 13). Après traction, la longueur du système est $\ell = \ell_0 - u_0$ et l'épaisseur de l'élément de sable est $dz(1 + \epsilon_z)$.

Si l'on suppose que le sable obéit à une loi de comportement élastique linéaire (module E_s et coefficient de Poisson ν_s) on peut écrire, en déformation plane : ($\epsilon_y = 0$)

$$(6) \quad \Delta \sigma_z = \frac{\nu_s}{1 - \nu_s} \Delta \sigma_x - \frac{\epsilon_z E_s}{1 - \nu_s^2}$$

avec, ϵ_z : déformation verticale du sable.

Le système considéré n'ayant pas tendance à

tourner, les moments sont nuls et la distribution des contraintes sous le géotextile et sur le sable sont symétriques. On peut donc écrire l'équilibre d'un élément de sable de longueur dx de la façon suivante :

$$(7) \quad (1 + \epsilon_z) dz \cdot d(\Delta \sigma_x) = 2 \hat{\tau} \cdot dx$$

En remplaçant $\hat{\tau}$ par sa valeur $\sigma_z \cdot \text{tg} \varphi$, d'après la loi de contact, et en intégrant en fonction de x , on a :

$$(8) \quad \sigma_z = \lambda e^{Ax} \quad \text{avec } A = \frac{\nu_s}{1 - \nu_s} \cdot \frac{2 \text{tg} \varphi}{(1 + \epsilon_z) dz}$$

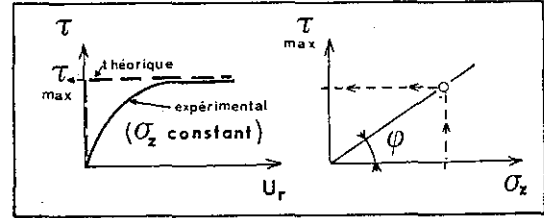


Fig. 12. Loi de contact sol-géotextile.

(Notons que la théorie de l'élasticité permet également de vérifier que le raccourcissement u_0 de l'élément est faible ce qui permettra, dans les intégrations suivantes, de confondre déplacement et déplacement relatif) Partant de (8) et en utilisant une équation identique à (7), on écrit l'équilibre du géotextile, ce qui conduit à :

$$(9) \quad T = 2B \cdot \text{tg} \varphi \cdot \frac{\lambda}{A} e^{Ax} + \mu$$

(B : largeur du géotextile).

On sait que pour $x = 0$, $T = 0$ et on veut $T = T_0$ pour $x = \ell$. Pour cela, on écrit le comportement élastique du géotextile de module K :

$$(10) \quad \frac{du_r}{dx} = \frac{T}{B \cdot K}$$

On sait que si $x = 0$, $U_r = 0$ et on appelle $U_r \ell$ la valeur de U_r pour $x = \ell$. En combinant (9) et (10) et en intégrant, on obtient :

$$(11) \quad T_0 = \frac{B \cdot K \cdot U_r \ell}{\frac{1}{A} - \frac{\ell}{A e^{A\ell}}} \quad A \text{ étant défini en (8)}$$

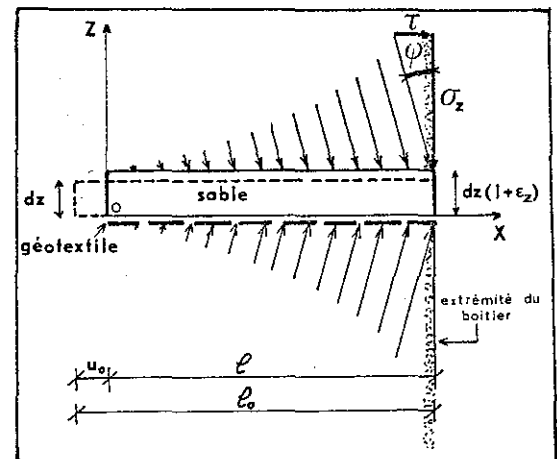


Fig. 13. Equilibre d'un système géotextile-sol de longueur initiale ℓ_0 et finale ℓ .

• Figure 10, en supposant que les propriétés du sable sont $E_s = 20\,000 \text{ kN/m}^2$ et $\nu_s = 0,3$ et en supposant $\epsilon_z = 0$. La valeur théorique ainsi obtenue pour T est représentée par β: cette courbe est très proche de la courbe expérimentale.