

GOURC, J. P, MATICHARD, Y., PERRIER, H. and DELMAS, P.
IRIGM, Université de Grenoble, Grenoble, France

Bearing Capacity of a Sand-Soft Subgrade System with Geotextile

Capacité portante d'un bicouche, sable sur sol mou, renforcé par géotextile

When considering a two layer system (a cohesionless soil subbase of thickness H and a clay subgrade) reinforced by geotextile, we obtained an increase of bearing capacity of the system under punching.

This subject is investigated here and can be applied to temporary roads on soft subgrades.

Numerous data obtained on models (quasi-static punching) enable us to perform an analysis of the influence of geotextile modulus, taking into account the setting conditions (free or fixed extremities of the fabric) and to outline the importance of anchorage design. Also other positions for the geotextile, particularly those close to the middle of the subbase, are considered.

The experiments suggest an interpretation of the fabric behaviour : membrane effect, under the axis of the load and lateral sliding of the anchorage with compatibility conditions of stresses and strains for the two zones.

Finally, the conditions of similarity for the model can be analysed.

I. OBJECTIFS

Cette étude de poinçonnement sur sol bicouche (sol pulvérulent sur sol cohérent) renforcé par un géotextile placé à l'interface avait plusieurs objectifs :

Le premier était de traiter le problème des chaussées provisoires sur sol mou, l'utilisation d'un géotextile s'étant montrée dans ce cas très intéressante. Notre modèle réduit est censé représenter une chaussée provisoire à l'échelle 1/3. La plaque simule la double roue d'un camion, et l'orniérage toléré étant dans ce cas important, l'essai de poinçonnement, effectué à vitesse d'enfoncement constante (0,04 mm/s) est poursuivi jusqu'à un enfoncement égal à la largeur de la plaque ($r = B$). La couche de forme est une couche de sable ou de gravette d'épaisseur H et la couche molle de fondation est une couche d'argile d'épaisseur $D = 0,50$ m (fig. 1). Ces essais de poinçonnement quasi-statique ont été complétés (1) par des essais de chargement répété simulant le passage de véhicules.

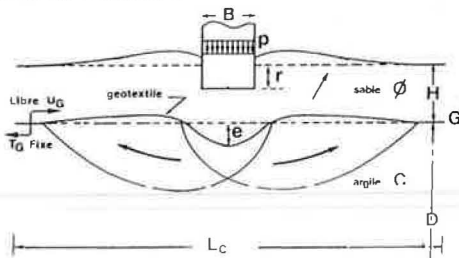


Figure 1 : Essai de poinçonnement type

L'étude présentée traite du gain de portance obtenu, lors du poinçonnement d'un sol bicouche (couche de forme pulvérulente d'épaisseur H sur couche de fondation argileuse) par la pose d'un géotextile à l'interface des 2 couches. Cette étude pourra s'appliquer en particulier aux chaussées provisoires sur sol mou.

Un important programme d'essais sur modèles réduits (poinçonnement quasi-statique) nous permet d'analyser le rôle du module du géotextile, suivant les conditions de mise en oeuvre (extrémités du géotextile fixes ou libres) et de mettre en valeur l'importance du dimensionnement de l'ancrage du géotextile. Enfin nous envisageons d'autres positionnements du géotextile, en particulier à mi-épaisseur de la couche de forme.

Ceci nous a permis de proposer un mécanisme traduisant le comportement du géotextile : fonctionnement en membrane, dans l'axe de la charge et ancrage glissant latéralement, les contraintes et déformations dans les deux zones devant être compatibles.

Ceci nous permet d'analyser les principales conditions pour que le modèle réduit respecte la similitude.

Le second objectif, plus général, était d'étudier le mode de comportement d'une inclusion textile dans un massif de sol à la rupture, afin d'optimiser le choix du géotextile et son positionnement dans l'ouvrage en terre. À ce titre les renseignements obtenus ici ont été utilisés pour un programme de calcul de stabilité de remblais sur sol mou renforcés à leur base.

II. MODELE EXPERIMENTAL : (2)

La cuve d'essai (fig. 1) est parallélépipédique (largeur $L_c = 2.3$ m, hauteur $h_c = 0.75$ m, épaisseur $l_c = 0.30$ m). La paroi frontale avant est en altuglass renforcé, ce qui permet de photographier la structure déformée du bicouche en cours d'expérience. Cette paroi se transmette latéralement pour permettre le montage et le démontage du massif d'argile (fig. 2).

La plaque est rectangulaire, $B = 0.15$ m de largeur égale à l'épaisseur 0.3 m de la cuve, afin d'obtenir un poinçonnement en déformation plane. Pour éliminer les effets de bords (frottement du sol en écoulement le long des parois frontales), les parois sont lubrifiées et la plaque est constituée d'une plaque centrale (0.15 m x 0.15 m) comprise entre deux plaques de garde (0.075 m x 0.15 m) et l'effort de poinçonnement est mesuré indépendamment sur la plaque centrale et les plaques latérales.

L'argile, moyennement plastique ($w_p = 20$ %, $w_L = 53$ %) est utilisée à une cohésion non drainée $C_u = 9$ ou 27 kPa. Le sol pulvérulent à granulométrie étroite est un sable inférieur à 1 mm ($\phi = 34^\circ$) ou une gravette concassée, entre 5 et 10 mm, ($\phi = 48^\circ$).

Les géotextiles sont soit des tissés de laminettes (t205 et t110), soit des non tissés aiguilletés polyester Bidim classiques (BD150, BD210, BD550) ou renforcé par

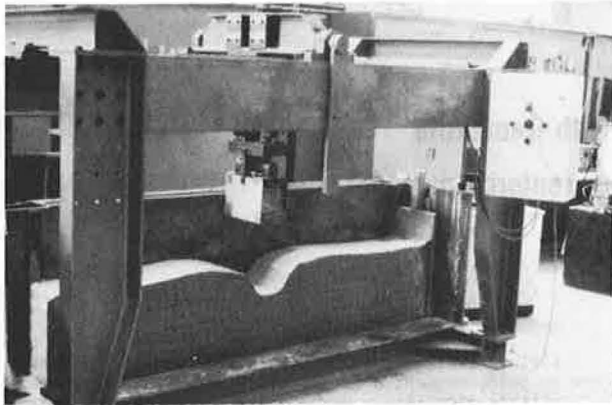


Figure 2 : Modèle expérimental

des multifilaments (BDrf), soit un non tissé thermolié polyester-polypropylène Terram (TM230) (notation : TM230, Terram de $\mu = 230 \text{ g/m}^2$).

Le géotextile placé à l'interface sol pulvérulent-sol cohérent fait toute la longueur de la cuve ($GG' = 2.20 \text{ m}$). Il est, soit libre à ses extrémités G et G' (et on mesure le déplacement horizontal u_G), soit fixé (et on mesure l'effort T_G). Plus quelques cas particuliers, nappe courte ($GG' = 1 \text{ m}$), bi-nappe (l'une des nappes est placée à mi-hauteur ($H/2$) de la couche de forme), ou conteneur (bi-nappe dont les deux nappes cousues entre elles aux extrémités confinent le sol à l'intérieur) (fig. 3).

Pendant l'essai de poinçonnement, on mesure l'enfoncement r de la plaque et l'effort de poinçonnement ($p \cdot B$) par ml, p étant la pression uniforme équivalente, on photographie le massif déformé, ce qui permet une mesure de e , la deflexion et B^* la largeur fictive à l'interface sable-argile.

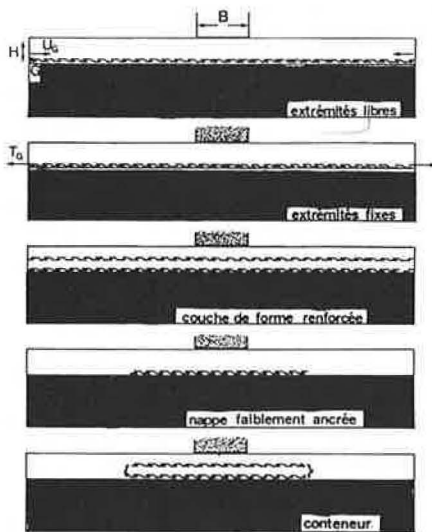


Figure 3 : Différents positionnements du géotextile

III. PARAMETRES MECANIQUES D'UN GEOTEXTILE

1. Traction en déformation plane

Dans la plupart des applications, le géotextile est sollicité en traction mais les déformations latérales sont empêchées.

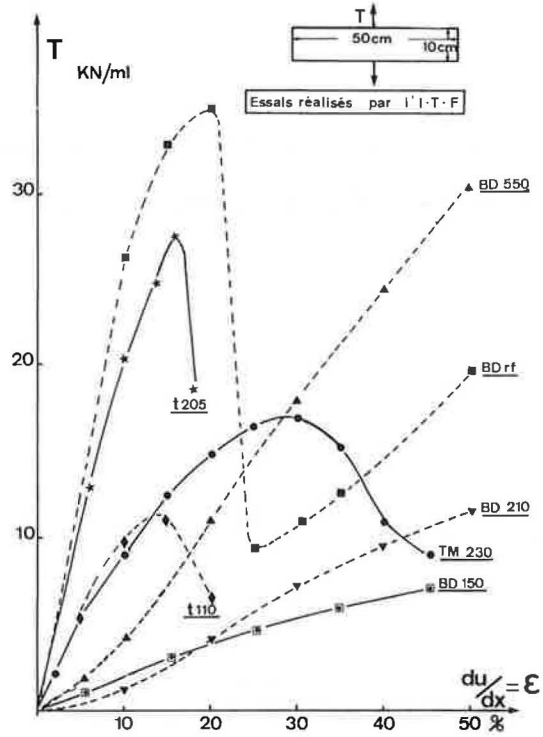


Figure 4 : Essais de traction sur géotextile

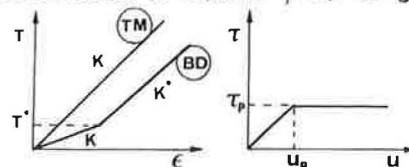
L'essai sur éprouvette (0.50 m sur 0.10 m de hauteur) correspond assez bien à ce critère. Il nous a permis de définir un module moyen de déformation plane : $T = K \cdot du/dx$ pour chaque géotextile (fig. 4). Pour certains géotextiles, il peut être nécessaire de définir deux modules, un module initial K pour $T < T^*$ et un module K^* pour $T > T^*$:

$$T = K^* du/dx + (1 - K^*/K)T^* \quad (1)$$

2. Interaction sol-géotextile :

Nous disposons d'une grande boîte de cisaillement (section 0.40 m x 0.25 m) permettant de mesurer l'angle de frottement ϕ pour un sol pulvérulent (ϕ) au contact ou l'adhérence \mathcal{G} pour une argile (C_u). (3).

Nous présentons ici quelques résultats particuliers obtenus pour des contraintes normales σ_N très faibles (fig. 5), correspondant aux conditions propres aux modèles réduits : alors que les géotextiles présentent généralement une bonne capacité de liaison avec les sols ($\phi = \phi$ et $\mathcal{G} = C_u$), lorsque σ_N devient trop faible pour appliquer correctement le géotextile sur le sol au contact, ϕ et \mathcal{G} mobilisés se trouvent minorés : pour chaque système sol-géotextile, il existera une contrainte σ_N critique en dessous de laquelle $\phi < \phi$ et $\mathcal{G} < C_u$.



3. Application : comportement en ancrage

Nous présentons (fig. 6) les essais d'ancrage effectués sur des nappes BD550 et TM230 de longueur initiale $GA = L_a = 1.54 \text{ m}$. Soit T_A l'effort en tête et u_A le déplacement correspondant.

La nappe est enterrée dans un massif de sable ($H = 0.31 \text{ m} \rightarrow \sigma_N = 4.8 \text{ kPa}$). A partir des lois de traction et de frottement définies ci-dessus, nous proposons une formulation théorique du comportement en ancrage :

TM230 est supposé posséder un module de traction K unique quel que soit T tandis que pour BD 550, on considère deux modules, le réarrangement initial des fibres de l'aiguilleté obligeant à considérer un module initial faible :

TM230 $K = 80 \text{ kN/ml}$
(fig. 4) BD550 $K = 35 \text{ kN/ml}$ pour $T < T^* = 3,5 \text{ kN/ml}$
et $K = 75 \text{ kN/ml}$ pour $T > T^*$

Le comportement en frottement sur sable est supposé elasto-plastique : $\tau = \alpha \cdot u$ pour $u < u_p$ et $\tau = \tau_p = \sigma_N \cdot \tan(\phi)$ pour $u > u_p$, u étant le déplacement relatif sol-geotextile.

TM230 $\phi = 36^\circ$ $u_p = 15.5 \text{ mm}$
BD550 $\phi = 35^\circ$ $u_p = 31 \text{ mm}$

En appliquant ces lois de comportement d'un bout à l'autre de l'ancrage géotextile, on détermine deux zones ($x < x_p$, $\tau < \tau_p$ et $x > x_p$, $\tau = \tau_p$). Dans le cas du module K unique, on écrit : $dT = -\tau dx$ et $T = K \cdot du/dx$ $\forall x$ et on obtient la tension T_A et le déplacement u_A en tête d'ancrage, pour un même x_p : (figure 6)

$$T_A = 2\alpha K \cdot u_p \frac{e^{\sqrt{\frac{2\alpha}{K}} x_p} - e^{-\sqrt{\frac{2\alpha}{K}} x_p}}{e^{\sqrt{\frac{2\alpha}{K}} x_p} + e^{-\sqrt{\frac{2\alpha}{K}} x_p}} + 2\tau_p(L_a - x_p) \quad (2)$$

$$u_A = u_p - \frac{\tau_p \cdot L_a^2}{K} + \frac{\tau_p \cdot x_p}{K} (2L_a - x_p) + \frac{T_A}{K} (L_a - x_p) \quad (3)$$

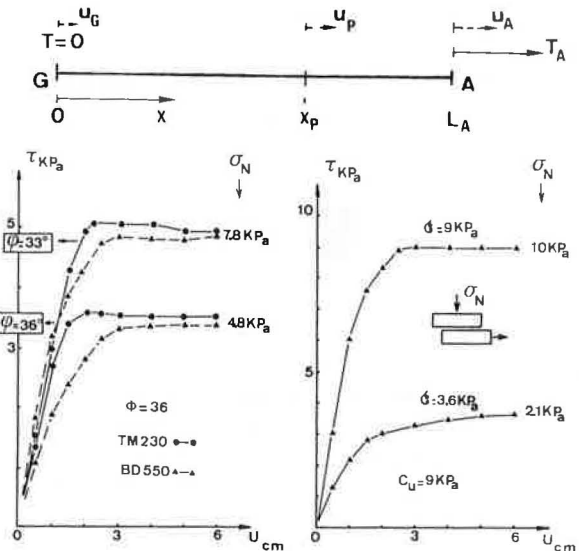


Figure 5 : Essais de frottement et d'adhérence sous faible contrainte normale σ_N

IV. MECANISME DE RENFORCEMENT PAR GEOTEXTILE ;

Les essais de poinçonnement (60 au total) ont été systématiquement effectués, pour les mêmes sols du bi-couche, avec géotextiles ($p_G = f(r)$) et sans ($p_0 = g(r)$) afin d'obtenir le gain de portance $\Delta p = p_G - p_0 = h(r)$. Ce gain s'est toujours révélé positif. L'action du géotextile présente en fait plusieurs aspects :

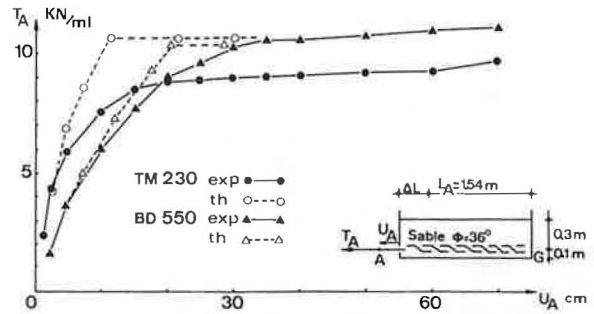


Figure 6 : Essais d'ancrage sur géotextile enterré dans un massif de sable

1. Effet anticontaminant :

Nous avons dans nos essais neutralisé cet effet en plaçant un film plastique sans résistance entre couches de forme et de fondation, dans le cas sans géotextile.

2. Effet membrane :

Le géotextile placé à l'interface s'oppose au poinçonnement de la couche d'argile, en se mettant en traction dans la zone sous la plaque (entre A et A' fig. 7). Ce schéma supposé pour la déformée de l'interface, à double arc de cercle, est en accord avec les relevés (fig. 8) Les effets "membrane" latéraux dus aux remontées d'argile latéralement à la plaque, pris en compte dans une théorie précédente (5), se sont révélés négligeables. Sur la "largeur fictive" B^* , le géotextile résiste à une pression uniforme Δq , en prenant la forme d'un arc d'ouverture 2θ . L'équilibre vertical du géotextile impose la mobilisation en appui d'une pression Δq suivant les arcs CA et C'A', de même rayon et ouverture.

$$\text{gain de portance } \Delta p_M \cdot B = \Delta q \cdot B^* \quad (4)$$

La distance horizontale B^* des points d'inflexion C et C' est pratiquement constante en cours d'enfoncement e (fig. 8b).

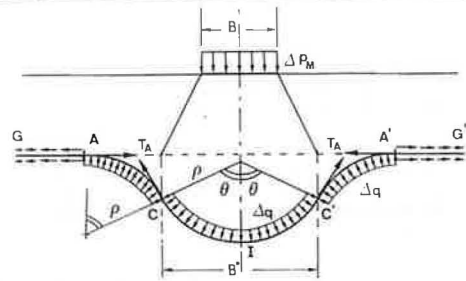


Figure 7 : Effet membrane du géotextile

$$e = B^* \cdot (1 - \cos \theta) / \sin \theta \quad (5)$$

$$\text{rayon } \rho = B^* / (2 \sin \theta) \quad (6)$$

La tension dans la membrane AA' est constante : $T_A = T_C = T_I = T$

$$\text{L'équilibre vertical impose : } \Delta p_M \cdot B = 2T_A \cdot \sin \theta \quad (7)$$

Pour une membrane élastique linéaire :

$$T = K \cdot (du/dx)$$

* membrane fixée en A et A' ;

La tension dans la membrane étant uniforme, la déformation l'est aussi :

$$e = du/dx = (\theta - \sin \theta) / \sin \theta \quad (8)$$

$$\text{d'où } T = T_A = K \cdot (\theta - \sin \theta) / \sin \theta \quad (9)$$

$$\Delta p_M \cdot B = 2 K \cdot (\theta - \sin \theta) \quad (10)$$

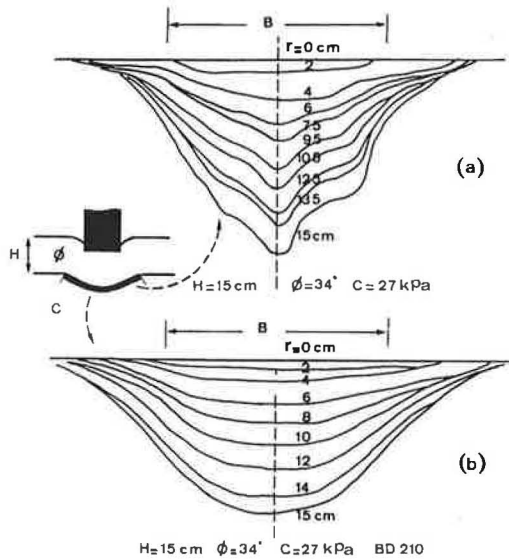


Figure 8 : Déformée de l'interface sable-argile en présence (b) ou non (a) de géotextile

La détermination expérimentale de B^* et e permet (5) d'évaluer θ , ainsi que T et Δp_M (9 et 10) proportionnels au module K du géotextile (abaque ci-contre).

Cependant ce calcul surestime l'effet "membrane" car A et A' ne sont pas fixes : T_A est repris par la longueur AG de géotextile servant d'ancrage à la membrane.

* membrane ancrée en A et A' :

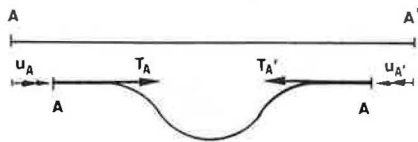
La reprise par GA d'une tension T_A nécessite un déplacement u_A (§ III.3) qui minore ϵ , T et Δp_M .

$$\epsilon = (\theta - \sin \theta - u_A \cdot \sin \theta / B^*) / \sin \theta \quad (8')$$

$$T = T_A = K (\theta - \sin \theta - u_A \cdot \sin \theta / B^*) / \sin \theta \quad (9')$$

$$\Delta p_M \cdot B = 2K (\theta - \sin \theta - u_A \cdot \sin \theta / B^*) \quad (10')$$

La compatibilité entre les relations (2) + (3) et (9') liant T_A et u_A soit en ancrage, soit en membrane, permet d'obtenir la solution de (9') et (10').



3. Effet repartiteur :

Le poinçonnement de la couche d'argile se produit suivant une largeur $B^* \neq B$ généralement. Cette largeur est définie comme la distance entre les 2 points d'inflexion principaux de l'interface du bicouche. Cependant sans géotextile $B_0^* = B$ avec le sable comme couche de forme (fig. 8a) et B_0^* légèrement supérieur à B pour la gravette, ces couches étant faiblement rigides.

Le géotextile augmente systématiquement B^* (fig. 8 et 9), le volume d'argile en écoulement plastique est aussi plus important. D'où un gain de portance :

$$\Delta p_R \cdot B = q_0 (B^* - B_0^*) \quad (11)$$

si la pression portante q_0 de l'argile est supposée non modifiée par la présence du géotextile.

Cette augmentation ($B^* - B_0^*$) peut se justifier partiellement par la compression horizontale de la couche pulvérulente due à l'ancrage géotextile (suivant AG et $A'G'$).

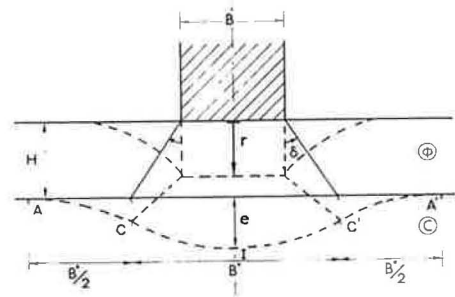
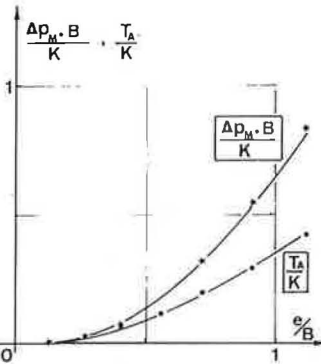


Figure 9 : Largeur fictive en présence de géotextile



V. BILAN DES ESSAIS EXPERIMENTAUX :

Le gain de portance ($\Delta p \cdot B = (p_G - p_0) \cdot B$) expérimental est toujours positif pour $r/B > 0,15$ et il croît avec r Figure 10 : Pour mêmes couches de forme et géotextile, le gain relatif de portance $\Delta p/p_0$ croît lorsque la qualité du sol de fondation décroît.

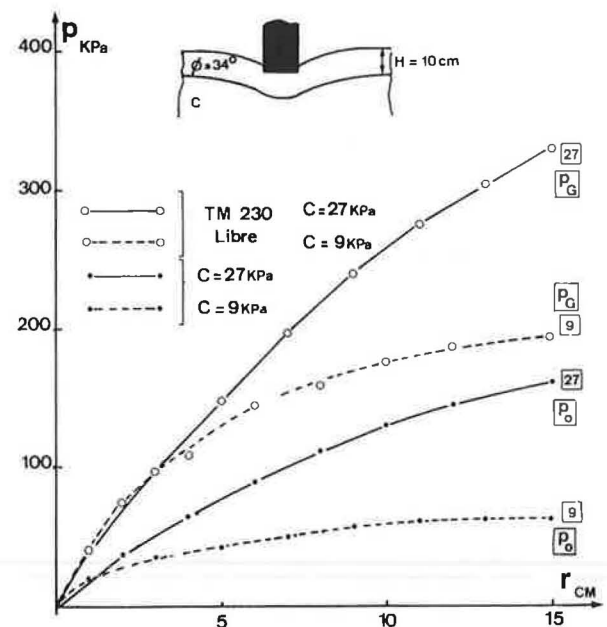


Fig. 10 : Influence de la qualité de la couche de fondation

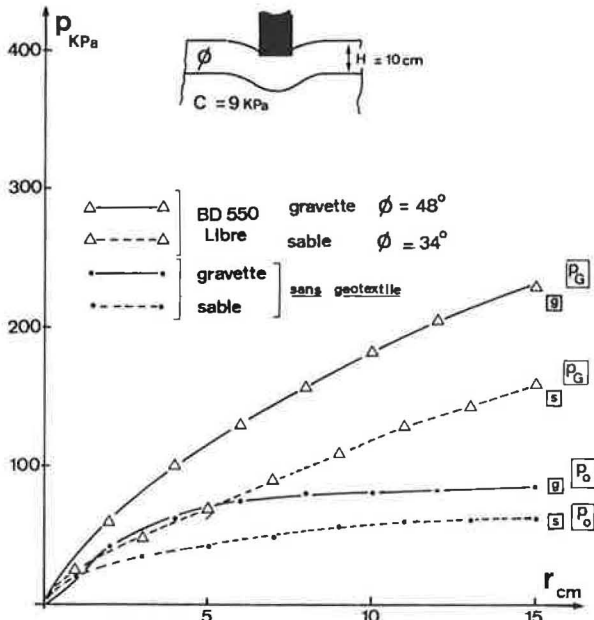


Figure 11 : Influence de la qualité de la couche de forme

Figure 11 : Pour mêmes couche de fondation et géotextile, $\Delta p/p_0$ apparaît plus important lorsque la qualité de la couche de forme s'améliore.

Figure 12 : Le mode de fixation du géotextile influence le gain de portance : $\Delta p/p_0$ augmente lorsque l'on fixe les extrémités G et G' du géotextile, à condition que celui présente un glissement u_G notable, dans le cas où G et G' sont libres. Dans ce cas, le fait de fixer G et G' mobilise une tension en bout T_G .

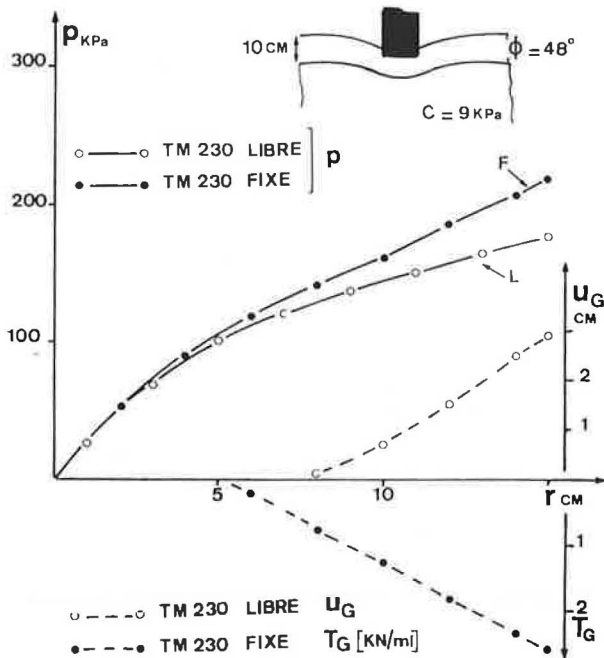


Figure 12 : Influence du mode de fixation du géotextile

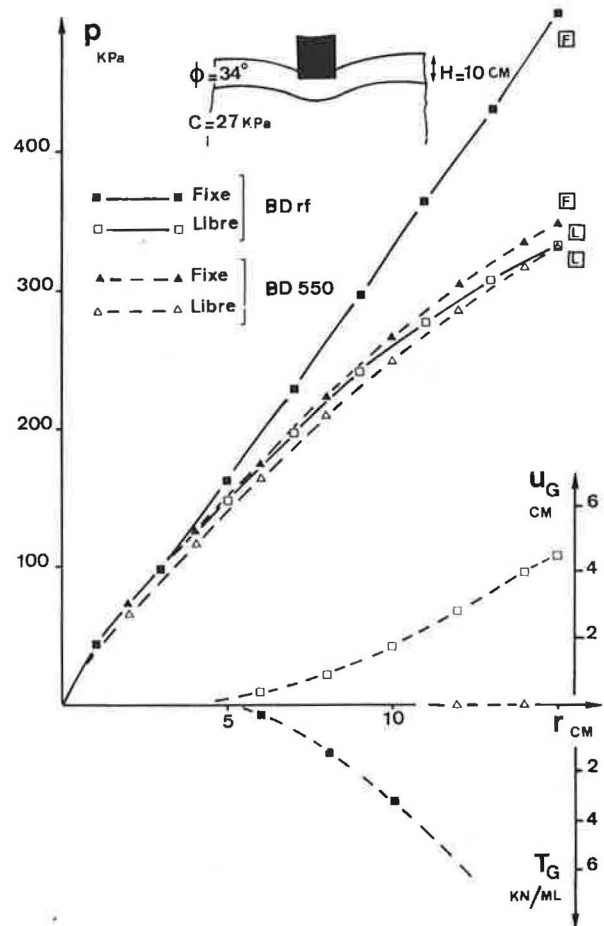


Figure 13 : Influence du module et mode de fixation du géotextile

Figure 13 : Pour une nappe fixée à ses extrémités, Δp croît avec le module. Pour une nappe simplement ancrée dans le sol adjacent, il semble bien exister un module optimal K à longueur d'ancrage donnée au dessus duquel Δp se stabilise : BD rf de module supérieur au BD550 tend à glisser en G et G', et le gain de portance est équivalent à celui du BD550 dont les extrémités ne glissent pratiquement pas. Notons que BD550 et BDrf ont même ϕ

Figure 14 : Une longueur d'ancrage insuffisante amène une diminution du gain de portance.

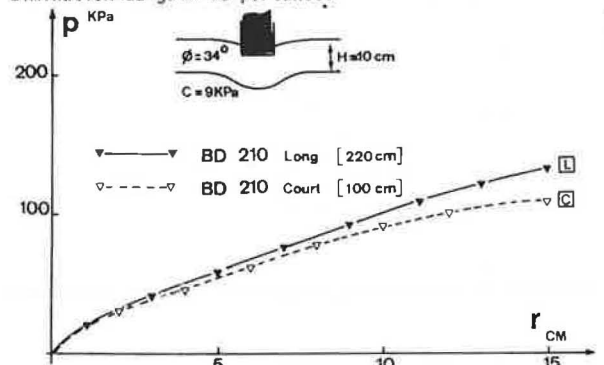


Fig. 14 : Influence de la longueur d'ancrage du géotextile

Figure 15 : On peut envisager de placer le géotextile autrement qu'à l'interface avec la couche de fondation (fig. 3). L'utilisation d'une nappe à mi-épaisseur de la couche de forme de faible rigidité (sable) est très profitable : un double BD210 apporte un gain de portance supérieur à un BD550 unique de même texture et de masse de fibre supérieure (550 g/m²). Un tissé de laminière t110 de module supérieur au BD210 est plus performant car il rigidifie davantage la couche de forme.

Enfin la technique du conteneur apparaît très intéressante. Elle pourrait permettre d'utiliser pour la couche de forme des sols de récupération à priori impropres à cet usage.

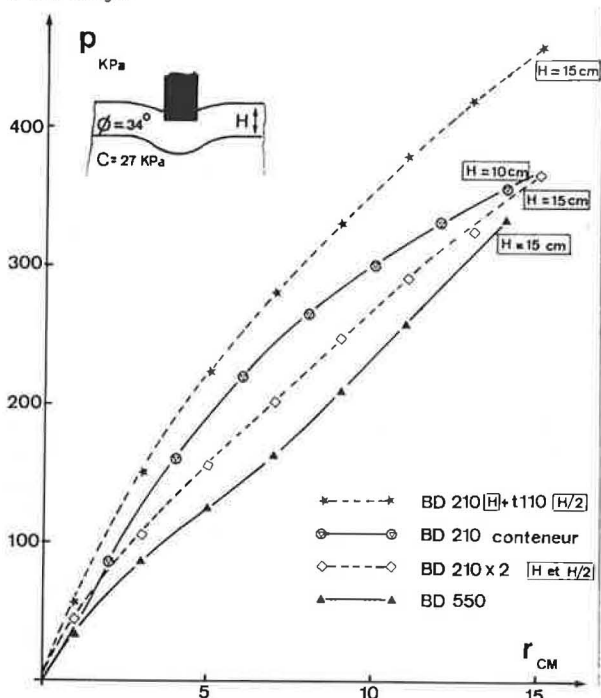


Figure 15 : Différentes mises en oeuvre du géotextile

VI. SIMILITUDE :

L'ensemble des essais présentés a permis d'analyser le fonctionnement d'un géotextile en situation et d'élaborer une méthode de calcul. Cependant les gains de portance $\Delta p/p_0$ obtenus sur modèle réduit seront systématiquement supérieurs à ceux obtenus en réalité, si le géotextile utilisé est le même dans les 2 cas : les principes de fonctionnement mécanique établis plus haut vont nous permettre de le démontrer :

Soit $L/L_r = 1/L^*$ l'échelle du modèle réduit, avec L_r une longueur pour le cas réel et L la longueur correspondante pour le modèle réduit.

Le modèle réduit devra présenter les mêmes déformations :

$$e^* = (\Delta L)^*/L^* = 1 \tag{12}$$

1. Sols en place, on prendra couramment $\gamma^* = 1$

Ceci impose pour les contraintes gravitaires et par conséquent pour l'ensemble des contraintes : $\sigma^* = \gamma^* \cdot L^* = L^*$ (13) Comme il s'agit d'un problème en grandes déformations, on s'imposera de respecter la similitude pour les contraintes à la rupture du massif de sol :

matériau pulvérulent : $\tau_{max} = \sigma_N \cdot \tan \phi$
avec $\tau_{max}^* = \sigma_N^* = L^*$
 $\rightarrow \phi^* = 1$ (14)

On utilisera le même matériau pulvérulent dans les 2 cas (quoique ϕ varie légèrement avec σ_N)
matériau cohérent : $\tau_{max} = C_u$

$$d'où \ C_u^* = L^* \tag{15}$$

Les cohésions devront être dans le rapport des longueurs : pour une cohésion $C_{ur} = 27$ kPa ($C_{BR} = 1$), on prendra $C_u = 9$ kPa pour le modèle réduit à l'échelle 1/3.

2. Géotextile, les lois de comportement énoncées au § III devront respecter la similitude

Comportement en traction : $T^* = K^* \cdot e^*$
avec $e^* = 1$ et $T^* = \sigma^* \cdot L^* = L^{*2}$

$$d'où \ K^* = (L^*)^2 = K_r/K \tag{16}$$

Les modules des géotextiles devront donc être dans le rapport du carré des échelles. Pour un modèle réduit à l'échelle 1/3, considérer le même géotextile que dans la réalité revient à considérer un géotextile 9 fois trop rigide.

Loi d'interaction sol-géotextile :

$$\text{La similitude impose } \phi^* = 1, \ \varphi^*/C_u^* = 1 \tag{17}$$

$$\text{et } u_p^* = L^* \tag{18}$$

En fait nous avons vu (§ III.2) que pour des contraintes normales inférieures à la contrainte critique, le contact sol-textile est imparfait, ce qui minore ϕ et pour de petits modèles, on veillera à bien appliquer le géotextile sur le sol, afin de vérifier (17).

La condition (18) (déplacements au palier à l'échelle) apparaît difficile à vérifier au vu de la fig. 5 et des résultats de (4).

3. Bicoche renforcé : Pour le bicoche sans géotextile, on vérifiera la similitude, une fois vérifiées (14) et (15) $\phi^* = 1, \ C_u^* = L^*$

$$p_{or}/p_0 = L^* \quad (p_c \cdot B)_r / (p_0 \cdot B) = (L^*)^2 \tag{18}$$

Nous négligerons le problème lié aux déformations de ce bicoche.

Le géotextile ancré doit vérifier les relations (2) et (3) : ceci impose $\phi^* = 1, \ \varphi^*/C_u^* = 1, \ u_p^* = L^*, \ K^* = L^{*2}$

Si l'une de ces conditions n'est pas vérifiée, la relation $T_A = f(u_A)$ n'est plus vérifiée en similitude.

De même, pour le géotextile en membrane, la vérification de l'ensemble des conditions ci-dessus permet de vérifier les conditions (8'), (9') et (10') :

$$e^* = 1 \quad T^* = (L^*)^2 = T_r/T \tag{19}$$

$$(\Delta p_M \cdot B)^* = (\Delta p_M \cdot B)_r / (\Delta p_M \cdot B) = (L^*)^2 \tag{20}$$

$$\text{Soit (18) et (20) : } (\Delta p_M / p_0)^* = 1 \tag{21}$$

Dans le cas où le géotextile utilisé est le même pour le modèle réduit, aucune relation simple ne permet le passage du modèle réduit au réel, on peut seulement affirmer que la modélisation amplifie le gain de portance.

REFERENCES :

(1) Gourc J.P., Perrier H., Riondy G., Rigo J.M., Perfetti J. : chargement cyclique d'un bicoche renforcé par géotextile. 2nd congrès international des géotextiles (Las Vegas, 1982)-
(2) Matichard Y. : Sol bicoche renforcé par géotextile. Thèse docteur-ingénieur. Université de Grenoble -(1981)-
(3) Delmas Ph., Gourc J.P., Giroud J.P. : Analyse expérimentale de l'interaction mécanique sol-géotextile. Colloque international sur le renforcement des sols - (Paris, 1979)-
(4) Collios A. : Loi d'interaction mécanique sol-géotextile. Thèse docteur-ingénieur - Université de Grenoble -(1981)-
(5) Gourc J.P., Matichard Y., Perrier H. : Reinforcement of unpaved roads by geotextiles. International Symposium RILEM - Plastic and structural Engineering - (Prague, 81)