

De GARIDEL, R., Cemagref, France

MOREL, G., Cete Normandie Centre, France

**TECHNIQUES NOUVELLES DE RENFORCEMENT DES SOLS PAR DES ELEMENTS TEXTILES EN VOIRIE
A FAIBLE TRAFIC****NEW SOIL STRENGTHENING TECHNIQUES BY TEXTILE ELEMENTS FOR LOW-VOLUME ROADS****NEUE TECHNISCHE VERFAHREN FÜR DIE VERSTÄRKUNG DER BÖDEN DURCH TEXTILELEMENTE
IN VERKEHRSSCHWACHEN STRASSEN**

Divers procédés sont apparus récemment pour renforcer mécaniquement un sol en lui incorporant des fibres textiles : fibres continues (Texsol), micro-grilles (Tensar) alvéoles de géotextiles remplies par le sol (Armatex, Nidaplast). Le CEMAGREF a entrepris d'étudier l'applicabilité de ces techniques à la construction de chaussées à faible trafic, à savoir routes rurales et forestières non revêtues dont il a la charge de la conception. Le comportement mécanique de ces structures a été examiné dans une cuve de dimensions 2 x 2 m en plan. C'est le renforcement mécanique d'un sable fin que l'on a choisi d'étudier ; celui-ci repose sur un sol limoneux peu porteur. Des essais de poinçonnement par une plaque circulaire rigide ont été réalisés : la courbe pression/enfoncement a été déterminée, ainsi que les pressions transmises dans le limon. Le comportement en petites et grandes déformations a été étudié : des résultats intéressants ont été obtenus en grandes déformations.

INTRODUCTION

Les géotextiles sont utilisés depuis plusieurs années sous forme de nappes à l'interface couche de base-sol naturel et éventuellement au sein de la couche de base pour renforcer des chaussées non revêtues (1). Depuis peu sont apparus divers procédés incorporant des éléments textiles au sol pour améliorer ses propriétés mécaniques (2) (3) (4) : ceux-ci paraissent particulièrement intéressants pour des routes non revêtues à faible trafic pour lesquelles des déformations non négligeables peuvent être tolérées ; tel est le cas des routes agricoles et forestières subventionnées par le Ministère de l'Agriculture : le CEMAGREF, qui a en charge leur conception, a ainsi été amené à étudier l'applicabilité de ces procédés à ce type de routes.

1 - DESCRIPTION SOMMAIRE DES PROCÉDES ETUDIÉS**A - Texsol**

C'est un composite sol-fibres tridimensionnel obtenu par incorporation de fils textiles continus ; celle-ci est réalisée en projetant les fils par voie pneumatique ou hydraulique dans le sol en mouvement : on obtient ainsi un mélange intime et homogène. La fabrication doit se faire en place, le matériau pouvant difficilement être repris. L'ajout de fils textiles continus dans un matériau granulaire augmente la résistance au cisaillement par apport d'une cohésion importante ainsi que la déformation à la rupture (2).

B - Armatex (*)

Il s'agit d'une nappe alvéolaire régulière et continue obtenue par collage de bandes de géotextiles entre

(*) fabriqué par la société Armatex (France)

Various processes have recently been developed to reinforce a soil by incorporating textile elements : continuous filaments (Texsol), micro-geogrids (Tensar), geotextile cells filled by the soil (Armatex, Nidaplast). The CEMAGREF began to investigate the suitability of such techniques for the construction of low-volume roads, i.e. rural and forest roads, because the CEMAGREF deals with the design of such roads. The mechanical behaviour of these structures was investigated in a 2 m long by 2 m wide pit. Mechanical strengthening of a fine-grained sand was chosen for these tests ; this sand lays on a silt with a small bearing capacity. Punching tests by a rigid circular plate were carried out : the load - settlement curve was obtained, and also the vertical stresses in the silt. The behaviour for small and large deformations was investigated : interesting results were obtained for large deformations.

elles par points ; les alvéoles sans fond sont de forme hexagonale de côté a et de hauteur b (fig. 1) ; le géotextile utilisé est un non-tissé aiguilleté légèrement imprégné par une résine pour conférer une certaine rigidité à la nappe. Cette structure est habituellement utilisée en protection de talus contre les érosions : elle permet, par sa résistance mécanique et son pouvoir drainant, de fixer le sol de remplissage dans les alvéoles (5). Son emploi en couche de chaussée fait appel au mécanisme de confinement du sol apporté par le géotextile.

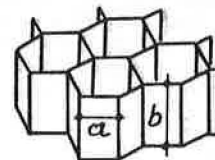


Fig. 1 : Schéma des alvéoles (Armatex, Nidaplast)

C - Nidaplast ()**

Il s'agit, là aussi, d'une nappe alvéolaire régulière ; elle est constituée de mailles élémentaires en polypropylène d'environ 10 x 10 cm (4 x 4 inch) fabriquées par extrusion ; les alvéoles sans fond sont de forme hexagonale dont le côté a mesure un peu plus de 1 cm et l'épaisseur b est variable (fig. 1) ; les mailles élémentaires sont ensuite assemblées en usine par soudage : on obtient ainsi des plaques de 2,50 m de

(**) fabriqué par la société Induplast (France)

longueur et de 1 à 1,50 m de largeur. En couche de chaussée, le mécanisme de renforcement est donc, comme l'Armater, le confinement du sol, auquel s'ajoute la rigidité propre de la structure.

2 - DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Il est constitué par une cuve métallique très rigide de 2 x 2 m (6,6 x 6,6 ft) en plan et 1,40 m (4,6 ft) de profondeur, solidaire d'une poutre servant de massif de réaction ; celui-ci permet d'enfoncer une plaque circulaire rigide (diamètre 0,30 m - 12 inch -) au moyen d'un vérin (fig. 2). L'effort vertical est mesuré au moyen d'un peson de compression et le déplacement vertical grâce à un capteur : un enregistreur X-Y permet ainsi d'obtenir directement la courbe pression-enfoncement. De plus des capteurs de pression sont disposés à l'interface sol naturel-chaussée, ainsi qu'au sein du massif de sol à 0,40 m (15,8 inch) au dessous de l'interface.

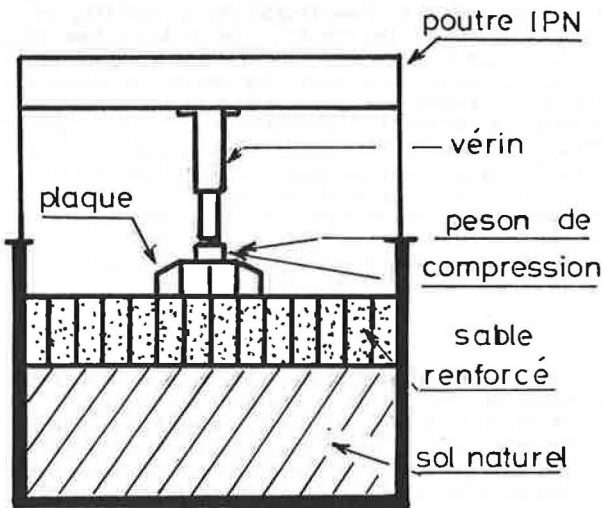


Fig. 2 : Schéma de la cuve d'essai

Le sol est constitué d'un limon identique à celui des expériences décrites dans (1). Sa teneur en eau lors des essais était de l'ordre de 18 à 20 % et son poids volumique sec en place γ_d de l'ordre de 17,5 kN/m³ ; sa portance, évaluée par un petit pénétromètre dynamique, correspondait à un indice CBR de l'ordre de 3.

3 - STRUCTURES REALISEES

C'est à chaque fois un sable naturel fin dont le renforcement a été étudié : les études actuelles sur le Texsol ont en effet surtout porté sur ce type de matériau ; pour le Texsol a été choisi un sable de Fontainebleau (France) (fig. 3) avec un fil textile standard en polyester de titre 50 dtex (5 g/km de fil) et un dosage pondéral de 0,25 % ; le système de fabrication du mélange, réalisé par une équipe du CETE Normandie, a été adapté au dispositif expérimental du CEMAGREF : l'écoulement du sable est obtenu par gravité et l'incorporation des fils textiles se fait par voie hydraulique (fig. 4).

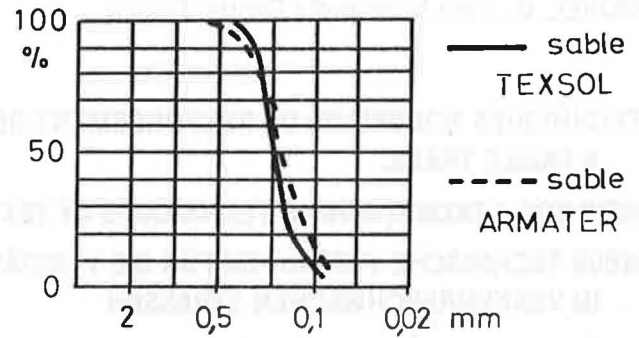


Fig. 3 : Granularité des deux sables essayés



Fig. 4 : Mise en oeuvre du Texsol

Deux structures d'épaisseurs différentes ont été étudiées, dont les caractéristiques sont indiquées table 1.

TABLE 1 : Caractéristiques des structures Texsol

structure	épaisseur (cm)	teneur en eau du sable (%)	γ_d moyen (kN/m ³)
1	30	12	16,2
2	15	16	15,7

Pour la structure 1, la valeur de γ_d correspond à l'optimum Proctor normal du sable seul. A noter qu'avec un dosage pondéral en fils de 0,2 % la cohésion c' et l'angle de frottement interne ϕ' (essais consolidés drainés sur sable sec avec des contraintes latérales de 50 à 150 kPa) sont respectivement de 360 kPa (51 psi) et 36° au lieu de 0 kPa et 39° pour le sable seul ; ainsi en utilisant des fils textiles et un dosage adéquats au sol donné à renforcer, on obtient donc une amélioration notable des caractéristiques mécaniques (6).

Pour le Nidaplast et l'Armater, c'est un sable fin de caractéristiques très voisines (fig. 3) mais d'origine différente (Maisse, France) qui a été choisi : il correspond à celui qui sera utilisé sur le chemin expérimental prévu avec ces divers procédés. Des nappes aux dimensions approximatives de la cuve d'essai ont été disposées au dessus du limon ; pour l'Armater il est nécessaire de la maintenir déployée par des piquets pendant le remplissage des alvéoles avec le sable, ce qui est inutile dans le cas du Nidaplast du fait de sa rigidité (fig. 5). Le sable est simplement déversé, en excès pour tenir compte du foisonnement, puis il est compacté par damage manuel, comme d'ailleurs pour le Texsol. Les caractéristiques des structures réalisées sont indiquées table 2. En ce qui concerne l'Armater, les propriétés du géotextile de base sont les suivantes : masse surfacique 320 g/m², résistance à la rupture en traction 16 kN/m.

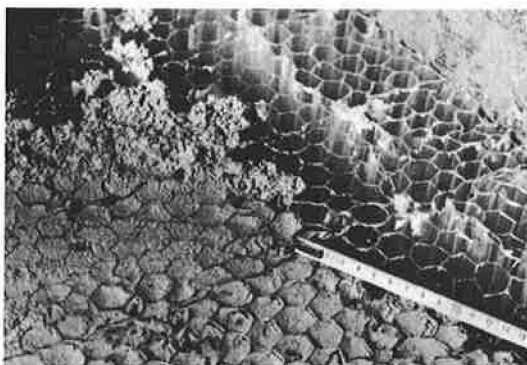


Fig. 5 : Mise en oeuvre du Nidaplast

TABLE 2 : Caractéristiques des structures Armater et Nidaplast.

structure	a (cm)	b (cm)	teneur en eau du sable (%)	γd moyen (kN/m ³)
Armater 1	7,5	15	7	14,3
Armater 2	5	10	7	14,4
Nidaplast 1	1,1	10	8	-
Nidaplast 2	1,1	5	8	-

Des essais de référence ont d'autre part été réalisés avec le sable de Maisse pour une épaisseur de 30 cm et une épaisseur de 15 cm. La teneur en eau du sable était de 7 à 8 %. Pour l'Armater, γd représente environ 96 % de γd maximum (Proctor normal).

4 - RESULTATS DES ESSAIS EN PETITES DEFORMATIONS

Des essais en 3 phases analogues à ceux de (1) ont été effectués sur chaque structure ; les 2 premières

phases permettent donc de caractériser le comportement en petites déformations.

On constate que le comportement de toutes ces structures est linéaire, y compris les structures témoin, lorsque les pressions appliquées sur la plaque demeurent suffisamment faibles (moins de 0,1 à 0,15 MPa). En ce qui concerne la déformabilité de la structure, ceci peut être précisé en calculant le module d'élasticité apparent E* :

$$E^* = \frac{\pi}{2} \frac{pR}{e} (1 - \nu^2)$$

R étant le rayon de la plaque, p la pression appliquée et e la partie élastique (réversible) de l'enfoncement déterminée lors de la phase 2 de chaque essai. Les valeurs obtenues sont indiquées dans la table 3.

TABLE 3 : Module d'élasticité apparent

	témoin 15 cm	témoin 30 cm	Texsol 15 cm	Texsol 30 cm	Nida-plast 5 cm	Nida-plast 10 cm	Arma-ter 10 cm	Arma-ter 15cm
E*(MPa)	22	30,5	19,5	33,5	13	16,5	13,7	14,2

La déformabilité de ces structures est donc analogue, en particulier il n'y a pas d'augmentation significative de la rigidité due au renforcement du sable ; en toute rigueur, il faut comparer des épaisseurs de sable identiques : le module des structures Texsol est voisin de celui des témoins, ce qui confirme des résultats précédents (4) ; il y aurait peut-être une légère augmentation avec l'épaisseur de la rigidité relative par rapport au témoin. Le module des structures Armater est un peu plus faible que celui des témoins (4), et du même ordre de grandeur que les structures Nidaplast.

Les courbes de la contrainte transmise σ_z à l'interface, ou bien au sein du massif de limon, en fonction de la pression appliquée présentent toutes une allure analogue (fig. 6) ; en ce qui concerne σ_z/p obtenue au sein du limon pour la droite qui constitue la première partie de ces courbes, on trouve des valeurs analogues pour les diverses structures de même épaisseur et de l'ordre de grandeur de celles de Boussinesq pour un massif semi-infini chargé uniformément en surface sur un cercle de rayon R ; en ce qui concerne σ_z/p obtenue à l'interface (ces mesures n'ont pas été faites pour les structures Nidaplast) on obtient des valeurs inférieures à celles de Boussinesq, (sauf pour le témoin 30 cm) : cette valeur correspond à un rapport E1/E2 (E1 module du sable renforcé ou non, E2 celui du limon) de l'ordre de 2,5

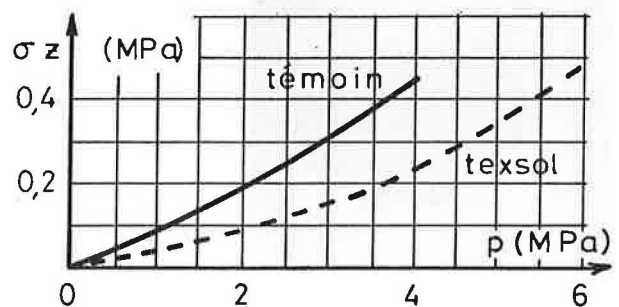


Fig. 6 : Courbes σ_z/p à l'interface

pour le témoin 15 cm et de l'ordre de 4 pour les structures Texsol ; par contre on obtient le même ordre de grandeur que celles de Boussinesq ($E1/E2 \neq 1$) pour l'Armater.

5 - RESULTATS DES ESSAIS EN GRANDES DEFORMATIONS

La phase 3 de chaque essai a permis de caractériser le comportement des diverses structures pour de forts enfoncements de la plaque, 5 à 6 cm (2 à 2,4 inch) en général, donc bien au delà du comportement linéaire initial.

Les courbes contrainte transmises σ_z en fonction de la pression appliquée présentent une pente beaucoup plus forte (fig. 6) ; celle-ci est même voisine de 1 à l'interface pour les structures témoin et le Texsol en 15 cm d'épaisseur ; ceci est à rapprocher du poinçonnement observé sur la structure témoin de 30 cm d'épaisseur : la plaque s'est enfoncée d'un seul coup de 1,5 cm à 13,5 cm de profondeur puis à 17 cm (fig. 7) ; il y a cisaillement vertical du sable et la déformée de la surface du limon est presque identique à celle du sable (fig. 8) ; ce mode de rupture est classique pour un bicouche constitué par un matériau pulvérulent d'épaisseur h reposant sur un sol mou lorsque h/R est suffisamment faible (7). On observe un phénomène analogue avec le Nidaplast, surtout en 5 cm : il y a une rupture de la structure alvéolaire sensiblement circulaire correspondant au contour de la plaque (fig. 9) ; la déformée de la surface du limon est analogue. Par contre les structures Texsol et Armater (fig. 10 et 11) ne sont pas cisailées verticalement : la déformée de surface a un rayon de courbure un peu plus important et surtout l'"empreinte" correspondante sur la surface du limon est plus grande et moins profonde ; le rapport entre la dimension en plan de la déformée du limon et celle de la surface est de 1,5 à 2 au lieu de 1 pour les structures témoins.

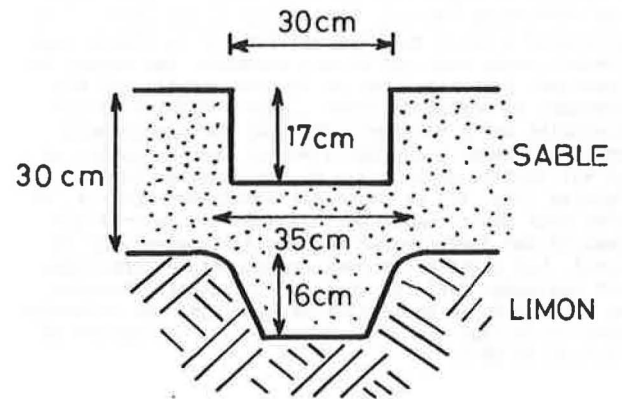


Fig. 8 : Déformée de la structure témoin



Fig. 7 : Témoin 30 cm après poinçonnement



Fig. 9 : Nidaplast après poinçonnement

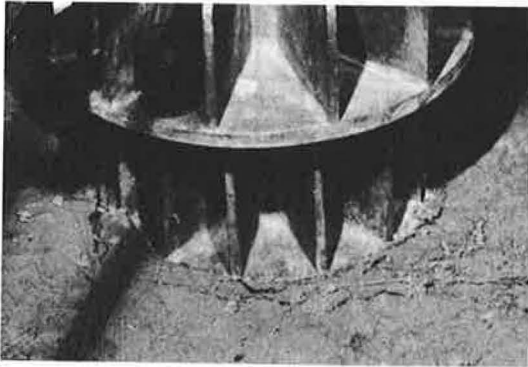


Fig. 10 : Textsol. après poinçonnement



Fig. 11 : Armater après poinçonnement

Les courbes les plus intéressantes sont celles reliant l'enfoncement de la plaque à la pression appliquée ; elles permettent de caractériser le gain de portance Δp pour un enfoncement donné : c'est la différence des pressions correspondantes entre la structure étudiée et la structure témoin. Le poinçonnement brutal de la structure témoin se retrouve sur

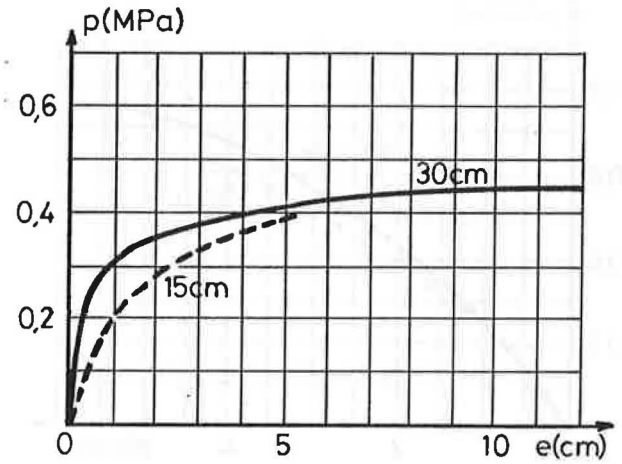


Fig. 12 : Courbes pression-enfoncement (témoins)

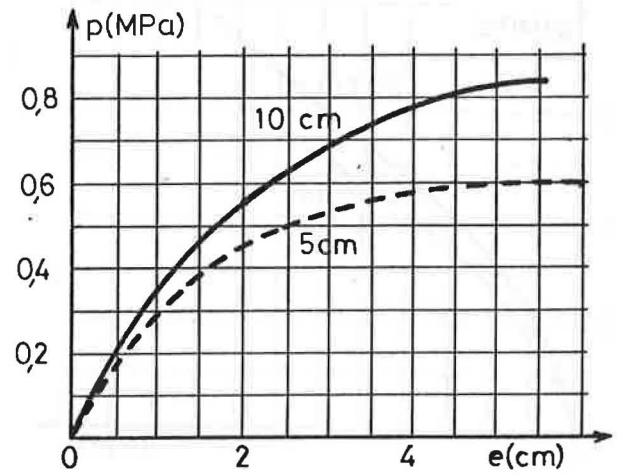


Fig. 13 : Courbes pression-enfoncement (Nidaplast)

l'allure de la courbe (fig. 12) : la pente finale est très faible ; on le retrouve dans une moindre mesure pour le Nidaplast surtout en 5cm d'épaisseur (fig. 13) ; la pente finale de la courbe pression-enfoncement est

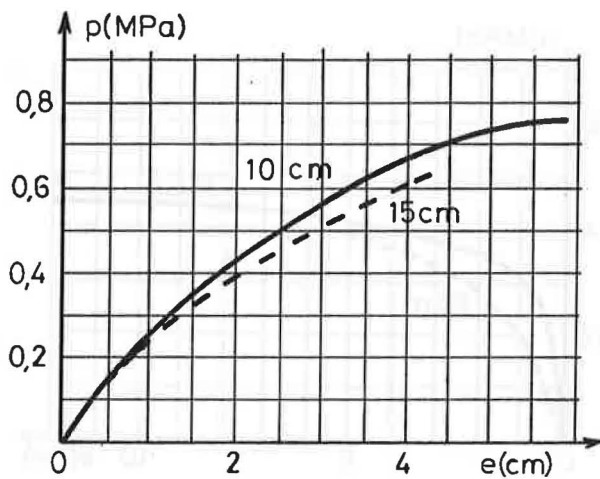


Fig. 14 : Courbes pression-enfoncement (Armater)

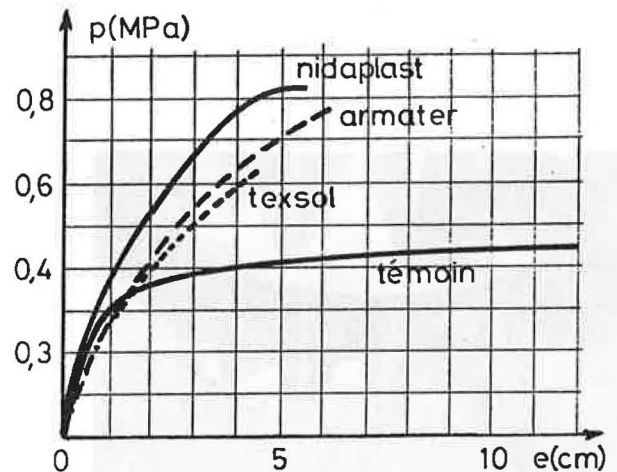


Fig. 16 : Comparaison des diverses structures

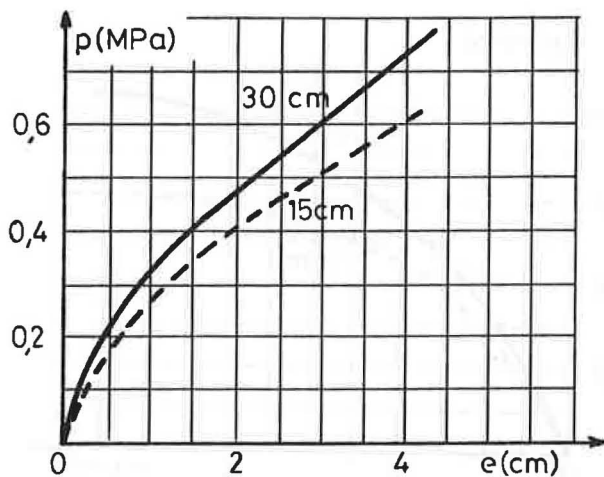


Fig. 15 : Courbes pression-enfoncement (Texsol)

par contre plus forte pour l'Armater (fig. 14) et surtout pour le Texsol (fig. 15) : la rupture n'est pas aussi nette. Pour le Nidaplast, c'est logiquement la structure ayant la plus grande épaisseur qui a le meilleur comportement, les alvéoles ayant la même taille ; par contre pour l'Armater, pour lequel c'est le rapport a/b qui est constant, ce sont les alvéoles les plus petites qui ont le meilleur comportement, bien que l'épaisseur soit plus faible. Si on compare des structures différentes ayant des épaisseurs du même ordre (10 à 15 cm), c'est le Nidaplast 10 cm qui donne des résultats un peu meilleurs (fig. 16) suivi par l'Armater 10 cm, mais les 3 types de structure donnent des gains de portance très appréciables par rapport à la structure témoin d'épaisseur double ou triple.

CONCLUSIONS

Les différents procédés étudiés pour renforcer un sable fin n'augmentent pas la rigidité de la structure en petites déformations : c'est là un résultat analogue à ce que l'on obtient en utilisant des nappes de

géotextile (1). L'effet de renforcement en grandes déformations est par contre tout à fait remarquable, en particulier, pour une épaisseur donnée, avec les structures alvéolaires. Ces résultats encourageants vont conduire le Ministère de l'Agriculture et le CEMAGREF à réaliser un chemin expérimental en vraie grandeur selon ces 3 procédés : il n'est pas encore construit à la date de rédaction de la communication ; il utilisera le sable testé en cuve avec le Nidaplast et l'Armater ; la possibilité d'emploi de matériaux locaux de ce type constitue en effet un avantage certain, en plus de la diminution de l'épaisseur de la chaussée.

REFERENCES

- (1) de Garidel R. et Javor E., "Etude du rôle mécanique des géotextiles dans les chaussées à faible trafic", *Comptes rendus du 3è Congrès International des géotextiles*, Vienne, 1986
- (2) Leflaive E., Khay M., Blivet J.C., "Un nouveau matériau : le Texsol", *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° 125, 1983, p. 105
- (3) Mc Gown A. et al., "Soil Strengthening using randomly distributed mesh elements", *Comptes rendus du 11è Congrès International de mécanique des sols et des travaux de fondations*, San Francisco, 1985, vol. III p. 1735
- (4) Khay M., Leflaive E. et Perrier H., "Routes économiques : routes en sable", *Comptes rendus du Colloque International "Routes et Développement"*, Paris, 1984, vol. II, p. 651
- (5) Note d'information DCT, Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes (France), n° 6, fév. 1985
- (6) Leflaive E., Khay M., Blivet J.C., "Properties of yarn reinforced soil : laboratory tests and theory", *Comptes rendus du 3è Congrès International des géotextiles*, Vienne, 1986
- (7) Lebègue Y., "Contrainte à l'interface d'un milieu constitué par du sable surmontant de l'argile molle", *Comptes rendus de journées nationales sur le comportement des sols avant la rupture*, Paris, mai 1971.