

IONESCU, A. et MATEI, S., Institut de Recherches Hydrotechniques de Bucarest, Roumanie

POSSIBILITES DE RENFORCEMENT DES MASSIFS EN TERRE AUX FIBRES OU FILS INDIVIDUELS, DECHETS DE L'INDUSTRIE

POSSIBILITIES OF REINFORCING EARTH MASSIVES WITH FIBERS OR INDIVIDUAL THREADS—INDUSTRIAL WASTES

BEFESTIGUNGSMÖGLICHKEITEN VON ERDMASSEN MIT SYNTHETISCHEN INDUSTRIEABFALL — FASERN ODER GARNEN

On présente dans cet article quelques résultats obtenus par les auteurs dans la direction de l'amélioration des caractéristiques physiques et mécaniques des sols par l'utilisation des fibres et des fils synthétiques individuels. En partant de l'idée que par l'introduction d'un élément de continuité dans la structure granulaire du sol, on crée des liaisons qui modifient le mode de transmission et répartition des efforts et des déformations, on expose des résultats de laboratoire obtenus sur des mélanges différents tant de point de vue du matériau granulaire utilisé, que des fibres et des fils (des résultats comme les déchets à l'industrie légère). A base des résultats de laboratoire, on fait des appréciations sur le comportement des mélanges par rapport aux caractéristiques du sol et des fibres ou des fils utilisables.

The paper presents some of the results obtained in improving the physical and mechanical characteristics of soil by using individual synthetic fibers and threads. Starting from the idea that the introduction of a continuity element in the grained structure of soil creates bonds modifying the manner of transmission and distribution of strains and stresses, there are presented the laboratory results obtained from mixtures differing from both the point of view of the used grained material and from that of the fibers and threads (waste materials resulting from the light industry). On the basis of the laboratory results considerations are made on the behaviour of mixtures as compared to the characteristics of soil and of the utilizable fibers or threads.

1. INTRODUCTION

La réalisation d'un complexe tridimensionnel par l'introduction d'un élément de continuité dans la structure granulaire des massifs en terre modifie le mode de transmission et répartition des efforts et des déformations, fait qui engendre des modifications de comportement de ceux-ci. Cette constatation a engendré, le long des siècles, de divers procédés de réalisation des constructions en terre, du simple mélange avec des pailles, fibres végétales ou copeaux de bois à des structures spatiales réalisées à l'aide des branches, poutres ou laceries de branchages remplies de terre et plus récemment, dans les dernières deux décennies, à la technique de la terre armée de type Vidal et au renforcement à l'aide des géotextiles.

Le développement dans les dernières années des géotextiles, matériaux qui ont pénétré dans la plupart des domaines des constructions, met en évidence les avantages que l'association des fibres et des fils synthétiques présente pour la terre.

Des études relativement récentes, présentées au Colloque International sur le renforcement des terres, Paris 1979 (1), le II-ème Congrès international sur les géotextiles, Las Vegas 1982 (2), ainsi qu'en diverses publications de spécialité (3), partant de l'idée du renforcement des terres par l'inclusion de fibres ou fils, de différentes catégories, démontrent, par des résultats de laboratoire, l'effet positif de cette initiative sur les caractéristiques physiques et mécaniques des massifs en terre.

En Roumanie, l'orientation de l'entière économie nationale vers l'utilisation judicieuse de toutes les ressources de matières premières et matériaux, a engendré une campagne assidue d'utilisation des matériaux récupérables dans tous les domaines d'activité.

En partant de ces prémisses, les auteurs de cet exposé

ont dirigé leur attention vers certains matériaux récupérables de l'industrie légère, qui, en mélange avec des matériaux granulaires, peuvent donner naissance à un nouveau matériau ayant des propriétés améliorées.

2. MATERIAUX UTILISES EN EXPERIMENTATIONS

Matériaux fibreux

- Duvet technologique des entreprises des textiles. Le matériau se présente sous la forme d'un mélange aléatoire de fibres par polymères synthétiques (avec maximum 10% polymères naturels) de longueurs non-filables (1-5 mm) et titres différents.
- Fils de polyacrylonitrile des entreprises de tricotages. Les déchets sont présentés sous la forme d'un mélange de fils avec des titres et longueurs différentes (5-500 mm).

Matériaux granulaires

On a utilisé deux catégories de terres, respectivement:

- terres à granulométrie constituée en laboratoire par matériau granulaire quartzéux de Văleni;
 - terre A (0,002 - 0,1 mm);
 - terre B (0,005 - 0,25 mm);
 - terre C (0,05 - 0,5 mm);
 - terre D (0,1 - 1,25 mm);
- terres en état naturel:
 - terre E (0,05 - 2,0 mm) - sable de rivière aux granules arrondis;
 - terre F (0,001 - 0,08 mm) - poussière argileuse contractile de Frunzaru-Boianu.

Dans la figure 1, on présente les compositions granulométriques des terres utilisées.

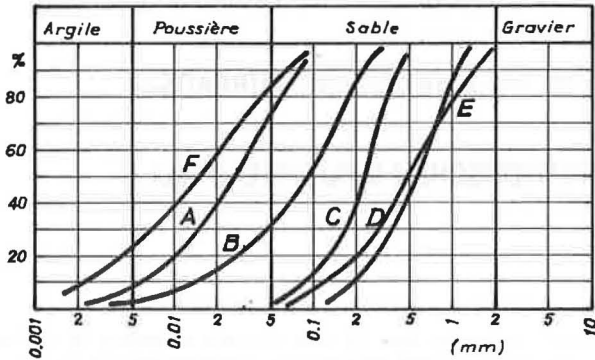


Fig.1. La composition granulométrique des terres étudiées.

3. MELANGES REALISES

On a réalisé les mélanges de terre-matériau fibreux:

- par agitation dans l'eau, à l'aide d'un agitateur rotatif (pour les terres A, B, C, D et duvet technologique);
- manuellement, en milieu sec (pour les terres E et F mélangées avec le duvet technologique ou les fils PNA).

Poursuivant les procédés de mélange mentionnés, on a préparé les recettes du tableau 1. Le temps de mélange a été différent d'une recette à l'autre, jusqu'à ce qu'on ait obtenu des matériaux homogènes (maximum 15 minutes pour les recettes C₁, C₂, D_{0,2} et D_{0,5}). On n'a pas réussi l'homogénéisation pour les recettes D₁ et D₂.

4. EXPERIMENTATION DE LABORATOIRE

Les expérimentations de laboratoire contiennent:

- Déterminations de cisaillement direct sur les mélanges type A, B, C et D.
- Déterminations de pénétration statique sur les mélanges type E.
- Déterminations pour établir l'angle de talus naturel, tout comme sur les mélanges type E.
- Déterminations pour apprécier le gonflement et le comportement à l'humectation-séchage sur les mélanges type F.

Tableau 1
Recettes de mélanges de terre-matériaux fibreux

Matériau granulaire	Mélange	Matériaux fibreux	
		duvet %	fil PNA %
A	A _{0,2}	0,2	-
	A _{0,5}	0,5	-
	A ₁	1,0	-
	A ₂	2,0	-
B	B _{0,2}	0,2	-
	B _{0,5}	0,5	-
	B ₁	1,0	-
	B ₂	2,0	-
C	C _{0,2}	0,2	-
	C _{0,5}	0,5	-
	C ₁	1,0	-
	C ₂	2,0	-
D	D _{0,2}	0,2	-
	D _{0,5}	0,5	-
	D ₁	1,0	-
	D ₂	2,0	-
E	E _{0,4}	0,4	-
	E _{0,8}	0,8	-
E	E _{0,12}	-	0,12
	E _{0,24}	-	0,24
F	F _{0,1}	0,1	-
	F _{0,5}	0,5	-
	F ₁	1,0	-

4.1. Cisaillement direct

Les déterminations de cisaillement direct ont été effectuées selon la méthode habituelle, en petites cassettes de cisaillement, non-inondé et non-consolidé, à vitesse constante de 1 mm/minute.

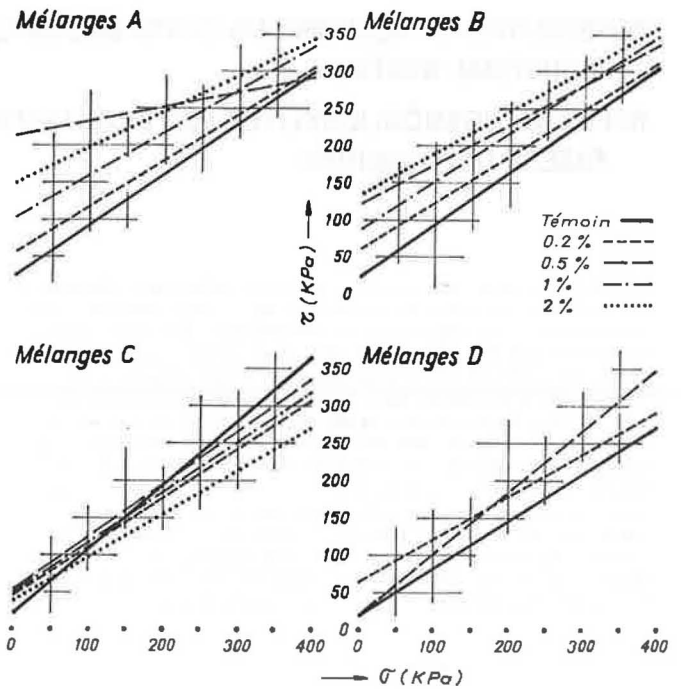


Fig.2. Caractéristiques de cisaillement.

Le mode de comportement des mélanges au cisaillement est présenté dans la figure 2, en représentations de droites intrinsèques comparativement témoin-mélanges. Les représentations mentionnées indiquent évidemment des modifications de caractéristiques de résistance pour toutes les recettes analysées. L'ampleur des modifications, considérées globalement, décroît par rapport à l'accroissement du pourcentage de grands granules, de type sable, en terre.

Pour souligner ces constatations, ainsi que dans le but de mettre en évidence l'influence de la quantité de l'adjonction de fibre, on a tracé les représentations de la

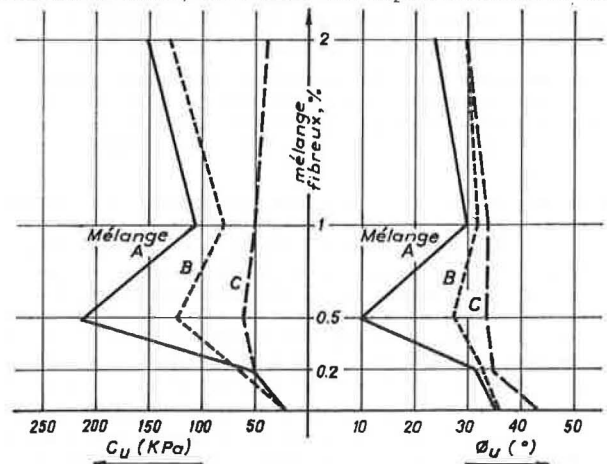


Fig.3. L'influence de la quantité de l'adjonction de matériau fibreux sur les caractéristiques de cisaillement.

figure 3. Poursuivant ce mode d'expression des résultats - pour les mélanges avec les terres A, B, C - on constate des accroissements de cohésion et des réductions de l'angle de frottement interne, en particulier pour les mélanges qui ont eu à la base les terres A et B (donc, les terres ayant plus de 30% granules plus petits que 0,03 mm). Aux mélanges dont les granules dépassent 0,05 mm, l'influence de l'adjonction de duvet technologique est de petite importance, ou même négative, si les granules dépassent, en proportion de plus de 50%, la dimension de 0,25 mm.

Un tel comportement peut être justifié en imaginant un modèle de structure des mélanges terre-fibre semblable à celui présenté dans la figure 4. Plus les granules de terre sont plus grands, les tortuosités décrites par les fibres du mélange sont moins accentuées, la longueur des fibres individuelles du duvet technologique n'est plus suffisante pour créer des mailles où on reprend les granules et en conséquence, le surplus de cohésion diminue.



Fig.4. Modèle probable de la structure matériau granulaire - fibre.

A base du même modèle de structure, qui met en corrélation la dimension des particules avec la longueur, la section et le titre des fibres, on peut justifier aussi les difficultés de réalisation des mélanges pour les terres D, ainsi que les diminutions de cohésion même sur la limite du témoin. En ce qui concerne le frottement interne, on peut supposer que, aux terres A, B, C et D, ayant des granuloses approximativement uniformes, par l'adjonction de fibre on crée la possibilité de la naissance des microplans de rupture, même dans la surface de rupture imposée par la cassette de cisaillement. Dans le contenu de ces microplans, le frottement a un caractère de roulement sur les fibres ayant une section cylindrique de la structure récemment formée. Ainsi se produit une décroissance de l'angle de frottement interne, dont l'ampleur diminue par rapport à la croissance des particules de terre.

4.2. Pénétration statique

Les déterminations ont été faites dans un montage simple de laboratoire qui réside en récipient métallique avec le diamètre de 150 mm et un piston cylindrique ayant le bout plat avec le diamètre de 15,0 mm pourvu d'un plateau pour des poids.

Les mélanges (type E) ont été réalisés, directement dans le récipient d'essai par le coulage concomitant du sable et du matériau fibreux en conditions d'ameublisement contrôlé.

Les déterminations de pénétration ont été faites comparativement pour le sable propre et les mélanges sable-matériau fibreux présentés. Tant le sable, que les mélanges avec des fibres synthétiques ont été réalisés à $I_D = 0$ et $I_D = 1$.

Le tassement maximum a été réalisé par le frappe avec un marteau lourd de 3 kg, avec 100 coups sur couche de 200 g.

Les pénétrations ont été faites par des chargements sur la surface du piston de 100 KPa; 200 KPa; 400 KPa et 800 KPa.

Sur le parcours des déterminations, on a mesuré les profondeurs de pénétration à de différents chargements et pour les 2 états d'ameublisement.

Dans le 2-ème tableau, on présente les valeurs de la porosité, de l'indice des pores et du poids volumétrique apparent sec obtenu pour les matériaux étudiés à $I_D = 0$ et $I_D = 1$.

Tableau 2

Propriétés physiques des mélanges type E

Matériau	I_D	n (%)	e	δ_d (kN/m ³)
Terre E (témoin)	0	48,03	0,924	13,98
	1	36,66	0,579	17,04
Mélange E _{0,4} s duvet 0,4%	0	51,42	1,0585	12,99
	1	40,52	0,681	15,82
Mélange E _{0,8} s duvet 0,8%	0	55,55	1,250	13,23
	1	44,59	0,805	15,97
Mélange E _{0,12} f fil PNA 0,2%	0	47,47	0,904	12,11
	1	37,96	0,612	15,87
Mélange E _{0,24} f fil PNA 0,24%	0	49,16	0,967	12,11
	1	39,77	0,66	16,30

Poursuivant les valeurs du tableau 2, on remarque une variation de la porosité par adjonction de matériau fibreux, qui, si dans le cas des mélanges avec le fil de PNA n'est pas significative (variations de maximum 3%, indifféremment du pourcentage de matériau synthétique par mélange), dans le cas de l'adjonction de duvet technologique, l'accroissement de porosité est de minimum 3% pour l'état ameubli, arrivant à 8-10% pour l'état tassé.

Pour l'appréciation du comportement à des sollicitations de pénétration statique des mélanges type E, on a défini un indice d'expression du surplus de résistance à la pénétration, noté ΔR , et ayant la forme suivante:

$$\Delta R = (1 - \frac{H_q \text{ mélange}}{H_q \text{ sable}}) 100 \quad (\%)$$

où:

H_q mélange = la profondeur de pénétration à la charge q, dans le cas du mélange sable-fibre (mm);

H_q sable = la profondeur de pénétration à la même charge q dans le cas du sable témoin (mm).

Le comportement des matériaux est illustré dans les figures 5 et 6.

Poursuivant les diagrammes, on remarque les suivants:

- Le surplus de résistance à la pénétration dans le cas des mélanges avec duvet technologique est relativement le même pour les deux pourcentages de fibre avec un maximum de l'ordre 20 de pour-cents pour tassement maximum.

- L'accroissement du pourcentage de duvet en mélange ne confère pas au matériau final des caractéristiques améliorées, mais au contraire, semble endommager. L'explication pourrait être le grand volume de duvet, qui, dans les conditions de mélange données, ne peut pas offrir de l'homogénéité au matériau final.

- Dans le cas des mélanges avec le fil PNA (E_{0,12} et E_{0,24}), le surplus de résistance à la pénétration est évidemment plus substantiel que dans le cas du duvet technologique, atteignant des valeurs de plus de 50% même pour l'état d'ameublisement maximum (à q = 100-200 KPa) de 40-60% dans le cas de l'état de tassement maximum indifféremment de la charge appliquée au piston et du pourcentage de fils en mélange.

- A la différence des mélanges avec duvet technologique, dans le cas des adjonctions de fils avec une grande longueur (de l'ordre cm), l'accroissement du pourcentage de fil en mélange influençant positivement le comportement de l'ensemble, en particulier dans la situation du matériau ameubli.

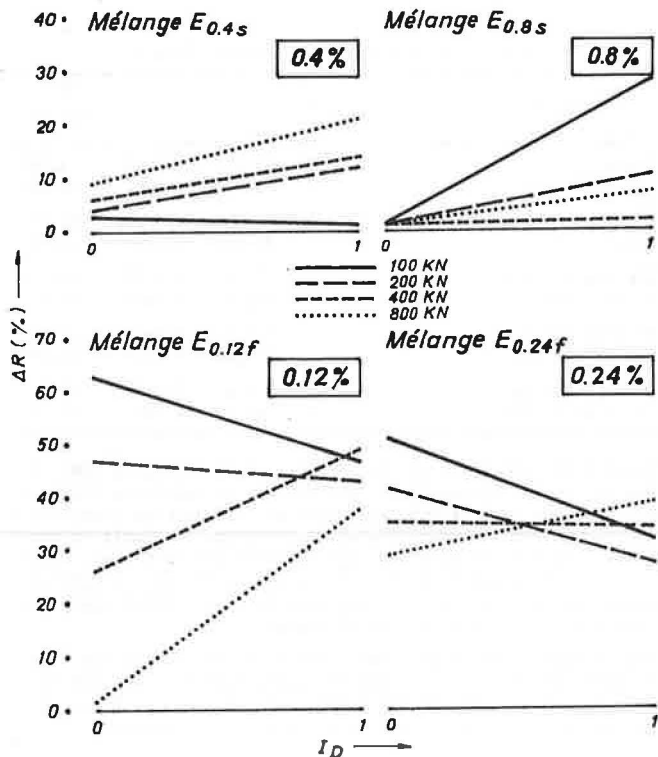


Fig. 5. L'influence de l'adjonction de fibres ou fils sur la résistance à la pénétration par rapport à l'état de tassement.

Ainsi, si le surplus de résistance à la pénétration pour de petites charges (100 - 200 KPa) est un peu différent par rapport au pourcentage de fil en mélange, 40 - 60% (pour 0,12%) par rapport à 50 - 70% (pour 0,24%) dans le cas des charges appliquées au piston de plus de 400 KPa, la différence de comportement par rapport au pourcentage de fil en mélange est de 40 - 50 pour-cents en faveur du mélange plus riche en matériau synthétique. Ces différenciations sont atténuées dans le cas du matériau tassé, oscillant pour les deux mélanges (0,12% et 0,24%) vers les valeurs de 40 - 50% (voir la figure 6).

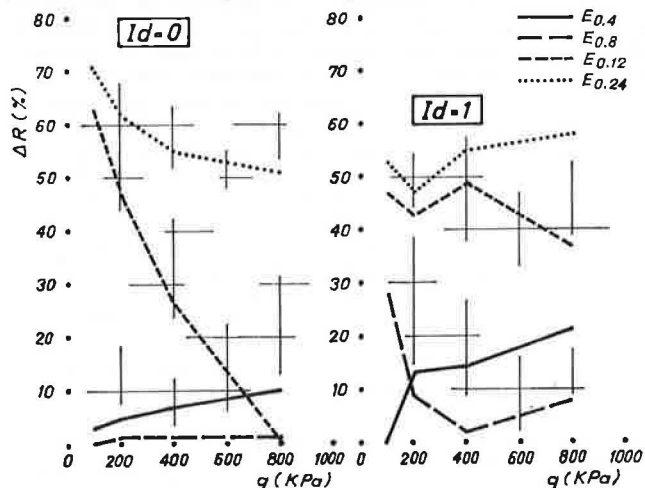


Fig. 6. L'influence de l'adjonction de fibres ou fils sur la résistance à la pénétration par rapport à la charge appliquée.

4.3. L'angle de talus

Les essais pour déterminer l'angle de talus naturel mettent en évidence, pour tous les cas analysés, l'accroissement de celui-ci dans le cas des mélanges sable-fibre synthétique. Les valeurs obtenues sont inscrites dans le tableau 3.

Tableau 3

L'angle du talus naturel pour les mélanges E

Matériau	Pour-cent de matériau fibreux en mélange	L'angle du talus naturel (°)
Terre E (témoin)	-	de la base du talus vers la cime 22°-32°
Mélange E _{0,4 s}	0,4%	uniforme 38°
Mélange E _{0,8 s}	0,8%	uniforme 38°
Mélange E _{0,12 f}	0,12%	de la base vers la cime 32° - 44°
Mélange E _{0,24 f}	0,24%	jusqu'à environ 1/2 talus - 34°; la deuxième moitié - 80°

Poursuivant les valeurs inscrites dans le tableau 3, on remarque, tout comme dans le cas des déterminations de pénétration, l'apport insignifiant de l'accroissement du pourcentage de fibre en mélange (en ce qui concerne la modification de l'angle de talus naturel) dans le cas des adjonctions de duvet technologique.

Dans la situation des adjonctions de fil PNA, l'angle du talus naturel est plus grand que dans le cas des mélanges avec le duvet technologique d'une part, et d'autre part le comportement de l'ensemble sable-fil est différent aussi par rapport au pourcentage de matériau synthétique ajouté. Ainsi, si au pour-cent de 0,12% le matériau est rangé sous la forme d'un "cône" avec les génératrices inclinées variables de la base vers la cime par rapport à l'horizontale avec 32° - 44°, à un pour-cent de 0,24% fil, le mélange est rangé sous la forme de 2 tronçons superposés, le supérieur ayant la génératrice inclinée à environ 80°. Ayant en vue l'utilisation de la même technique de mélange dans tous les cas et supposant la réalisation des mélanges homogènes, le comportement du sable avec une adjonction de 0,24% fil PNA est, dans la phase actuelle d'étude, difficile à justifier.

4.4. L'appréciation du gonflage et du comportement à l'humectation-séchage

Les déterminations d'appréciation qualitative du gonflage et du comportement à l'humectation-séchage, ont été faites conformément à des méthodes adéquates au but proposé, c'est-à-dire:

- pour les deux déterminations, on a prélevé des pastilles cylindriques avec h = 10 mm et d = 60 mm de la terre F et les mélanges avec celle-ci, compactés initialement à Proctor normal et W_{opt}, qui ont été gardées dans les matrices de prélèvement;
- pour le gonflage, les preuves de matériau ont été en contact avec l'eau au gradient constant (fig. 7) pour une

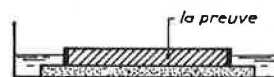


Fig. 7. Montage pour l'appréciation du gonflage.

période de 100 heures, en mesurant, à différents intervalles, la variation de volume;

- pour l'humectation-séchage, les preuves ont été sou-



Photos 1-3. Le comportement à l'humectation-séchage des mélanges type F:
a_{1.2} - témoin après 3 cycles; e_{2.2} - terre F plus duvet 0,5% - 5 cycles; e_{3.2} - terre F plus duvet 1% - 6 cycles.

mises à des cycles d'humectation lente et séchage en étuve à 105°C, 8 heures pour chaque phase de détermination; pour estimer le comportement après chaque phase, on a pris des photos.

Gonflage

Dans la figure 8, on présente l'allure des courbes de gonflage pour la terre F témoin et pour les 3 recettes de mélange avec 0,1%, 0,5% et 1% duvet technologique.

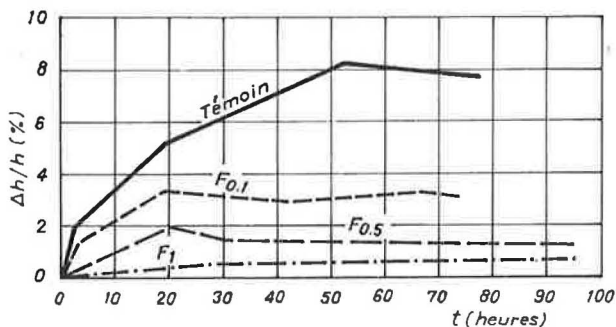


Fig.8. L'influence de l'adjonction de fibres sur le gonflage.

Poursuivant l'évolution du phénomène, on constate l'apport certain des fibres en mélange à la diminution du gonflage, fait qui est accentué simultanément avec l'accroissement du pourcentage de duvet.

Un tel comportement argumente encore dans la faveur du modèle de structure exposé au paragraphe 4.1.

Comportement à l'humectation - séchage

Poursuivant les images des photos 1-3, on remarque aussi des modifications de comportement de la terre contractile témoin (la preuve "a") par rapport aux mélanges réalisés avec le duvet technologique (la preuve e_{2.2} - 0,5% et la preuve e_{3.2} - 1%) dans le sens de la diminution de l'ouverture et de la profondeur des fissures après le séchage. Le phénomène est accentué simultanément avec l'accroissement du pourcentage de fibre en mélange.

Dans ce cas aussi, le modèle de structure, illustré dans la figure 4, est confirmé.

5. CONCLUSIONS

• Bien que l'expression des conclusions définitives, dans le stade actuel des recherches, soit prématurée, on peut affirmer qu'il y a des possibilités réelles de modification du comportement des terres en utilisant des fibres synthétiques comme telles, récupérées de l'industrie légère.

• Les résultats des tests présentés permettent des constatations favorables, qui, à l'avenir, développés à base de recherches approfondies tant sur les types de terre renforcables, que sur les types de fibres utilisables, deviendront des certitudes dans le sens de l'obtention des matériaux de construction avec des propriétés de résistance considérables par rapport aux terres dont ils proviennent.

• Les tests faits jusqu'à présent ne sont pas en mesure de donner des indications certaines sur l'utilisation du type de fibre optimum et sur les dosages à l'efficacité maximum.

• De point de vue des domaines d'utilisation des nouveaux matériaux, on apprécie l'existence des possibilités d'application dans tous les cas où on demande au matériau de construction de la résistance mécanique, élasticité et perméabilité élevée.

REFERENCES

- (1) Hoare, D.J., "Laboratory study of granular soils reinforced with randomly oriented discrete fibres", Compte Rendu du "Colloque International sur la renforcement des sols", Paris 1979, p.47 - 52.
- (2) Leflaive, E., "Le renforcement des matériaux granulaires avec des fils continus", Proc. of the Second International Conference on Geotextiles, Las Vegas 1982, p.721 - 726.
- (3) Leflaive, E., Khany, M., Blivet, J.C., "Un nouveau matériau: le Texsol", Bulletin de liaison des laboratoires de ponts et chaussées, No.125/1983, p.105-114.