

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

# Sol renforcé par des fils continus: le Texsol

## Soil reinforced with continuous yarns: the Texsol

E. LEFLAIVE, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France

### RESUMÉ

Les avantages fondamentaux de l'emploi des géotextiles dans les ouvrages en terre -résistance, ductilité, continuité, capacité de drainage et de filtration- peuvent être obtenus tridimensionnellement par l'association de sols et de fils continus.

La communication décrit le procédé Texsol breveté et développé par les Ponts et Chaussées ainsi que le travail de recherche et de développement des applications effectué au sujet de cette technique. Les techniques de fabrication, les mécanismes de comportement et les propriétés du matériau sont présentées ; avec du sable, une cohésion de 100 à 200 kPa est obtenue avec un dosage pondéral en fil de 1 pour mille.

Les applications en cours de développement concernent les remblais, les routes, les voies ferrées, les barrages et les ouvrages sous-marins.

Depuis plus de dix ans, le développement des géotextiles illustre les avantages de l'introduction des fibres synthétiques dans les sols dans tous les domaines de la géotechnique. Sur le plan mécanique, le géotextile est un élément de continuité qui modifie le transfert des contraintes et la répartition des déformations, d'où une profonde modification du comportement du sol aussi bien sous l'effet des charges statiques que réputées.

Sur le plan hydraulique, les milieux fibreux ont la particularité de pouvoir présenter des porosités très élevées, associées à des diamètres de filtration faibles, avec par conséquent des propriétés très intéressantes pour le drainage et la filtration. De plus, le fait d'éviter les discontinuités dans les déformations est également un avantage important vis-à-vis du risque d'érosion interne.

Le développement des géotextiles s'est fait jusqu'à présent surtout sous la forme de nappes, c'est-à-dire de grandes surfaces de faible épaisseur, auxquelles on peut ajouter quelques applications particulières comme les drains verticaux, ou certaines tentatives d'armatures textiles que l'on peut considérer, par rapport à la masse du sol, comme des éléments à une dimension. A trois dimensions, on a réalisé des massifs multicouches constitués de nappes de géotextiles intercalées entre des couches de sol. On a cependant encore peu utilisé de composite sol-fibres à trois dimensions, dans lequel l'association du milieu granulaire et des éléments fibreux est suffisamment intime pour constituer un matériau que l'on puisse considérer comme homogène.

On peut pourtant penser que les ressources potentielles du mariage sol-fibres, évoquées brièvement ci-dessus, peuvent donner à un tel matériau des propriétés intéressantes.

Au cours de ces dernières années, le L.C.P.C. a entrepris des recherches sur la faisabilité d'un tel matériau ; les premières études ont abouti au dépôt d'un brevet et la recherche actuelle porte sur les propriétés de ce matériau et sur le développement de ses applications. L'idée est de réaliser le mélange le plus intime possible d'un sol, tel qu'un sable par exemple, et de fils continus ; on a appelé Texsol le résultat de cette association. Cette communication résume les études faites et présente le premier cas concret d'application, de dimensions encore modestes.

### PRINCIPE DU PROCEDE

Le principe du mélange d'un matériau granulaire et de fils continus consiste à projeter un ou plusieurs fils, par voie pneumatique ou hydraulique, sur le matériau granulaire en mouvement, par exemple à l'extrémité d'une bande transporteuse, à la sortie d'un tuyau de remblai hydraulique, ou plus généralement à la sortie de tout système de transport ou d'épandage. On obtient alors un mélange tridimensionnel désordonné de fils et de particules solides ayant des propriétés mécaniques et hydrauliques intéressantes qui sont décrites plus loin.

Dans ce qu'il a d'essentiel, le principe du procédé est donc d'associer à un matériau discontinu à frottement interne des éléments continus souples, dans une disposition géométrique désordonnée et tridimensionnelle. Il se distingue donc nettement :

- des composites où les éléments continus sont noyés dans une masse à laquelle ils sont liés par adhérence ;

- des associations sol-armatures où ces dernières

sont disposées de façon régulière et rectiligne, dans un sens déterminé et avec des espacements grands par rapport aux dimensions des particules du sol ;

- des mélanges utilisant des fibres coupées.

Les différences avec les procédés ci-dessus, qui apparaissent au niveau des composants et de leur mode d'association, se traduisent aussi au niveau du comportement, ainsi qu'on le verra plus loin.

#### ETUDES EXPERIMENTALES

Les premiers essais de laboratoire ont été faits par projection pneumatique de fil sur du sable entraîné dans un courant d'eau ; les premiers essais à plus grande échelle, portant sur quelques mètres cubes, ont été réalisés par projection du fil à l'eau sur du sable déversé par une bande transporteuse.

A ce stade, des essais assez simples et surtout qualitatifs ont été faits pour avoir une idée du comportement du Texsol et en estimer l'intérêt éventuel. En laboratoire, on a fait des essais de compression simple et des essais de poinçonnement qui se sont révélés très encourageants. Des essais plus élaborés ont alors été réalisés, dont les résultats sont indiqués ci-dessous.

#### Essais de poinçonnement

Ces essais ont été effectués suivant la procédure de l'essai CBR, sur des matériaux secs. Pour le sable seul, l'essai a donné la valeur de 37 (avec surcharge). Avec un pour mille de fil la valeur obtenue est de 65 ; elle atteint 100 pour un dosage de 3,5 pour mille.

#### Essais de compression simple

Des éprouvettes de 100 mm de diamètre et 200 mm de haut ont été fabriquées directement dans des moules avec un dispositif de fabrication spécial, étant donné que le carottage normal d'une éprouvette dans un massif n'est pas possible en raison de la présence des fils. Les résistances en compression simple mesurées ont été trouvées approximativement proportionnelles au dosage en fil, avec une valeur de 300 à 400 kPa pour un pour mille en poids.

#### Essais triaxiaux

Les essais ont été réalisés sur trois sables différents, sur des éprouvettes à l'état lâche et à l'état compacté, avec des dosages compris entre 1,4 et 2 pour mille, et des éprouvettes de sable seul, sans fil. Il s'agissait d'essais consolidés drainés, avec des valeurs de la contrainte horizontale comprises entre 50 et 500 kPa.

A l'état compacté on obtient un maximum, puis une décroissance du déviateur dans les éprouvettes avec fils comme dans les éprouvettes sans fil. (Fig. 1). Une différence du processus de rupture est cependant que la déformation axiale au maximum du déviateur de contrainte pour les éprouvettes avec fils est beaucoup plus élevée que pour les éprouvettes sans fils, atteignant 6 à 8 % contre 2 à 4 %.

Du point de vue de la résistance mécanique,



Fig. 1 - Epreuve de Texsol rompue à l'essai triaxial

la présence du fil se traduit par l'apparition d'une cohésion de 150 à 250 kPa pour les dosages de 1,4 à 2 pour mille, pour les éprouvettes compactes. Pour les éprouvettes lâches, la cohésion mesurée est plus faible, inférieure à 100 kPa.

#### Essais triaxiaux à chargements répétés

Ces essais ont été faits pour s'assurer que, même avec un sable concassé, la répétition des charges n'amenait pas une fatigue prématurée due au cisaillement des fils.

Les conditions d'essai étaient les suivantes : teneur en eau 12 % ; poids volumique sec 18 kN/m<sup>3</sup> ; étreinte latérale 50 kPa ; déviateur dynamique = 0,4 - 0,46 - 0,5 ou 0,64 fois le déviateur de rupture statique ; nombre de cycles 10<sup>5</sup> ; fréquence 0,5 Hz jusqu'à 200 cycles, 1 Hz jusqu'à 2 000 cycles, 5 Hz jusqu'à 10<sup>5</sup> cycles ; dosage en fil voisin de 2 pour mille.

On a constaté une déformation axiale cumulée augmentant linéairement en fonction du logarithme du nombre de cycles, avec une déformation axiale finale comprise entre 2,5 et 6 % (sauf dans le cas où le déviateur atteignait 0,64 fois le déviateur de rupture en statique, et où il y a eu rupture en cours d'essai).

Ce comportement en fatigue est donc normal, sans abrasion particulière des fils. Deux éprouvettes avec fils ont été rompues statiquement après avoir subi 10<sup>5</sup> cycles ; leur résistance a été trouvée de 55 % plus élevée que les éprouvettes équivalentes non soumises aux chargements répétés, ce qui provient de leur consolidation.

Une autre constatation faite au cours de ces essais concerne le module de déformation du matériau. Les différents modules mesurés sont dans l'ensemble un peu plus élevés lorsqu'il y a présence de fils, mais pas dans une forte proportion. Les modules tangents à l'origine de chaque cycle ne sont pas, en moyenne, plus élevés avec fils.

En conclusion de ces essais, on constate que l'adjonction de fils continus souples à un matériau granulaire a pour effet de lui conférer une cohésion importante en augmentant sa capacité de

déformation à la rupture, mais sans accroître de façon notable le module du matériau dans le domaine des petites déformations.

#### AVANTAGES ESSENTIELS DU MODE DE LIAISON PAR FILS

Par rapport aux liants travaillant par adhérence, l'efficacité d'une liaison par fils ne dépend pas de la granularité du matériau granulaire, alors qu'une granularité contenant aussi peu de vides que possible est nécessaire pour bien utiliser un liant travaillant par adhérence.

Ce mode de liaison permet par conséquent de traiter des matériaux naturels de granularité creuse, qui ne seraient pas susceptibles d'un traitement classique sans correction granulométrique.

Par ailleurs, la liaison par fils d'un matériau très creux permet d'obtenir un matériau résistant mais conservant une forte perméabilité. On peut en effet considérer que la perméabilité n'est pas affectée par la présence des fils, puisque ceux-ci n'occupent qu'une fraction négligeable du volume des vides (de l'ordre de 1 % pour un dosage de deux pour mille).

Du point de vue hydraulique, la présence d'un réseau de fils au sein du matériau constitue, à condition que le fil utilisé soit assez fin et le mélange, assez régulier, un filtre tridimensionnel incorporé dans la masse, qui améliore la résistance à l'érosion interne du matériau granulaire initial. Il faut en effet bien noter que, même pour des dosages pondéraux aussi faibles que un pour mille, la longueur de fil par unité de volume traité est très importante si l'on utilise des fils de titres courants dans l'industrie textile. C'est ainsi par exemple que pour un matériau de densité sèche 1,7 traité à un pour mille par du fil de 100 décitex, la longueur de fil est de 17 cm/cm<sup>3</sup> ; pour des dosages et des titres différents, cette longueur est proportionnelle au dosage et inversement proportionnelle au titre. (Fig. 2).

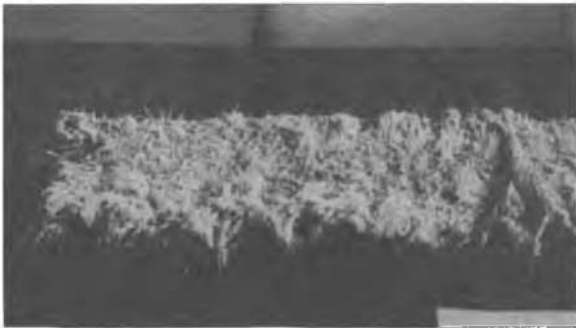


Fig. 2 - Eprouvette Texsol avec deux pour mille de fil (après congélation puis rupture)

Du point de vue mécanique, en plus de la possibilité de traiter un matériau de granularité creuse, le procédé présente l'avantage unique de pouvoir réaliser un matériau résistant non rigide, par conséquent non fragile, et pouvant s'adapter à des déformations, problème souvent posé par les ouvrages de génie civil.

Il présente enfin la caractéristique de ne pas exiger de temps de prise.

#### MECANIQUE DE LA LIAISON PAR FILS CONTINUS

Les mécanismes par lesquels des fils continus souples incorporés à un milieu granulaire modifient son comportement mécanique sont différents de ceux qui interviennent dans un composite à matrice continue, et de ceux qui sont responsables de la tenue d'un système du type de la terre armée.

Une première observation est que, pour un matériau où les fibres ne sont liées que par frottement et non par adhérence, les longueurs d'ancrage que l'on peut calculer pour des états courants de contraintes, en supposant qu'il y a un bon contact entre les fibres et le sol, sont de l'ordre de la dizaine de centimètres ou du mètre. Il en résulte donc que des fibres coupées de quelques centimètres, comme celles que produit couramment l'industrie textile, ne peuvent pas être efficaces, alors qu'elles peuvent l'être dans un composite où les fibres sont noyées dans une matrice continue à laquelle elles sont liées par adhérence.

Une deuxième observation est que l'hypothèse d'un "bon contact" entre les fibres et le sol granulaire, faite pour calculer la longueur d'ancrage, n'est pas vraisemblable si l'on tient compte de la flexibilité et des dimensions transversales d'un fil textile et du fait que le fil ou les fibres n'occupent qu'un volume de l'ordre de 1 % du volume des vides du milieu granulaire. On ne peut donc pas, dans ce cas, faire l'hypothèse, comme dans la terre armée, que la contrainte normale moyenne régnant au sein du milieu s'applique à la surface de l'armature et calculer la contrainte tangentielle possible à partir du coefficient de frottement. On peut au contraire considérer, à la limite, que les fibres textiles serpentent à l'intérieur du réseau des vides du milieu granulaire sans être serrées au sein de ce milieu.

En fait, cette hypothèse est probablement elle-même excessive, mais on doit supposer que le fil n'est serré au sein du milieu que de points en points et que, par conséquent, la contrainte moyenne qui règne dans le milieu n'est transmise que partiellement au fil, et que l'effort tangentiel disponible correspondant n'est lui-même que partiel.

On pourrait alors, à ce stade de l'analyse, douter de l'efficacité du procédé, même avec des fils continus dont la longueur d'ancrage disponible n'est pas limitée. En fait, le procédé est efficace, car deux autres mécanismes interviennent dans son fonctionnement :

- le premier mécanisme est lié à la tortuosité du fil. Chaque fil présente de nombreuses sinuosités ; lorsqu'un fil est mis en tension, des forces de frottement se développent dans les zones incurvées et introduisent une résistance qui croît en fonction de la tension appliquée sur le fil, à condition que quelques efforts localisés, au moins minimes, s'opposent à son glissement. Ce mécanisme, lié à la courbure, est celui que l'on retrouve utilisé par exemple dans la marine pour retenir un navire par une corde avec la force d'un seul homme, en enroulant la corde autour

d'une borne d'amarrage ;

- le second mécanisme est lié à l'entrecroisement des fils. Si la tension exercée sur une boucle tend à déplacer le fil transversalement par rapport à lui-même, il rencontre immédiatement d'autres fils qui s'opposent à ce déplacement et auxquels se transmettent des efforts, mettant ainsi en jeu de nouvelles zones du matériau.

Les deux mécanismes décrits brièvement ci-dessus ne sont présents ni dans les composites à matrice continue ni dans la terre armée. Le matériau décrit dans cet article est donc bien entièrement distinct de ces deux conceptions.

Un dernier cas, présentant apparemment une analogie avec ce matériau, est celui des couches géotextiles constituées de boucles de gros filaments à forte raideur qui s'enfoncent dans le sol et permettent l'ancrage d'un filtre ou donnent au sol une certaine raideur élastique.

Ce cas est profondément différent de celui présenté dans cet article, car il s'agit seulement d'une couche de 2 ou 3 cm d'épaisseur et non d'un matériau en masse, et parce que, dans une telle couche, les boucles ont une forte rigidité en flexion associée à une très faible résistance en traction (il s'agit de filaments non étirés amorphes), alors que dans le matériau il s'agit de fils multifilament parfaitement souples qui travaillent en tension.

#### DEVELOPPEMENT

Le développement de ce matériau est actuellement poursuivi au sein des Laboratoires des ponts et chaussées, notamment par le Centre d'expérimentations routières de Rouen (C.E.R.), le laboratoire régional de Rouen et le Centre d'études et de construction de prototypes (C.E.C.P.) de Rouen également.

Un petit chantier a été réalisé en novembre 1982 à Caudebec-en-Caux. Il s'agissait du glissement



Fig. 4 - Le remblai de Caudebec en cours de réalisation

de la moitié supérieure d'une falaise de craie altérée, sur une hauteur de 6 mètres, dont la réparation était nécessaire à la fois pour protéger l'espace situé plus bas et pour rétablir un chemin piétonnier à la partie supérieure.

Un remblai en Texsol (voir figure 3) de 6 mètres de haut avec un talus incliné à  $60^\circ$  sur l'horizontale a été construit sur une dizaine de mètres de longueur. Le matériau de base est du sable de Seine auquel il a été ajouté 2,3 pour mille de fil continu polyester 330 décitex 60 brins de résistance 36 cN/tex. La réalisation a été faite en utilisant une machine à béton projeté pour la mise en place du sable et avec projection manuelle du fil entraîné par un courant d'eau sous pression (Fig. 4).

Le comportement du remblai, sur lequel n'a été placée aucune protection extérieure, est excellent, aucun mouvement ni érosion n'ont été observés.

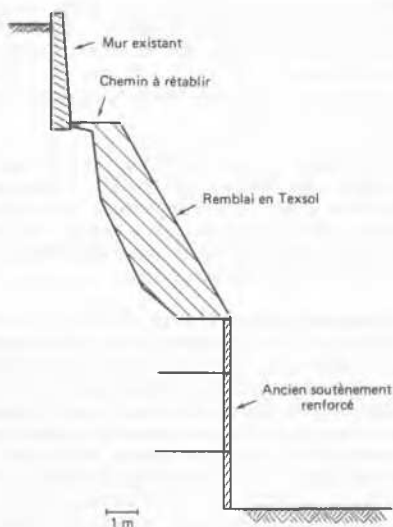


Fig. 3 - Coupe de l'ouvrage de Caudebec