

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

LIAUSU, PH., Société d'Application du Texsol, Paris, France

LE RENFORCEMENT DES SOLS PAR FILS CONTINUS

THE REINFORCEMENT OF SOILS BY CONTINUOUS THREADS

BODENBEWEHRUNG MIT ENDLOSFASERN

Les principaux aspects du comportement du matériau, appelé Texsol, obtenu par renforcement d'un sol par fils continus sont rappelés. Les résultats d'essais triaxiaux sont présentés. On décrit ensuite les réalisations de chantier actuelles.

DESCRIPTION

La technique de renforcement géotextile présentée consiste à mélanger intimement un sol granulaire et des fils continus. Le principe en est décrit dans une communication présentée au II^e congrès international des géotextiles (1). On obtient le mélange in situ en projetant le sol par un procédé mécanique (bande transporteuse, projecteur mécanique), pneumatique (type béton projeté par exemple) ou hydraulique et en projetant simultanément un certain nombre de fils continus ; ils se mélangent dans leur chute et au moment de leur impact avec les matériaux déposés précédemment. Un matériel de chantier conçu spécialement doit donc être utilisé ; le matériau doit être produit en place car il n'est pas possible de le reprendre par la suite.

La proportion normale de fil, en poids par rapport au sol sec, est de 0,1 à 0,2 %. Ce dosage représente une grande longueur de fil par unité de volume, compte tenu des titres utilisés qui se situent entre 100 et 500 décitex. Pour un dosage de 0,2 % d'un fil de 150 décitex dans un sol de masse volumique 1,8 g/cm³, 1 cm³ de sol contient 24 cm de fil. On voit donc que le fil et le sol sont intimement associés et que le matériau peut donc être considéré comme un matériau homogène du point de vue de l'ingénieur. Ceci est en particulier vrai à l'interface de deux couches : il n'y a pas d'interface à proprement parler car l'échelle du maillage du fil à l'intérieur du sol est inférieure à l'échelle des irrégularités de surface de chaque couche mise en place. Il y a donc interpénétration des réseaux de fil des deux couches et mobilisation réciproque en cas de sollicitation mécanique.

L'emploi de fils continus est un élément essentiel car des fibres courtes, mélangées par brassage avec un matériau granulaire n'améliorent pas efficacement son comportement par suite du manque d'ancrage des fibres. La longueur d'ancrage nécessaire pour équilibrer par le frottement dans le sol la résistance d'un fil textile moyen est en effet plutôt de l'ordre du mètre que du centimètre. Des fils continus disposés de façon sinuée dans le milieu granulaire sont donc la solution la plus efficace, la courbure des fils multipliant l'effet du frottement ; de plus le fil continu se prête bien au moyen d'incorporation choisi, à savoir la projection simultanée des deux composants.

PROPRIÉTÉS

La présence des fils dans un milieu granulaire a pour principal effet de créer une cohésion du milieu. Les fils et les particules du sol ne sont liés que par frottement.

The main features of the behaviour of the material, called Texsol, resulting from the reinforcement of a soil by continuous threads are reminded. Results from triaxial tests are presented. Then work-site construction is described.

Dès que le matériau commence à se déformer sous l'effet d'une sollicitation, les fils sont mis en tension par les forces de frottement et donnent au matériau une cohésion.

Cette cohésion est mesurée dans les essais habituels de mécanique des sols : essais de compression simple et essais triaxiaux. Les éprouvettes pour ces essais sont des éprouvettes cylindriques $\phi = 100$ mm H = 200 mm fabriquées en laboratoire et compactées sur table vibrante.

Les essais de compression simple sont faciles à réaliser et permettent une approche du comportement du mélange formé par un sable donné et un type de fil donné. Cependant l'expérience montre que dans de nombreux cas les essais de compression simple sous-estiment la valeur de la cohésion que l'on trouve par ailleurs par les essais triaxiaux ; ce sont donc ces derniers qui sont utilisés pour obtenir les résultats numériques destinés au calcul des ouvrages en Texsol.

De plus, seuls les essais triaxiaux permettent de déterminer à la fois l'angle de frottement et la cohésion, la résistance à la compression simple n'étant qu'un effet combiné des deux phénomènes.

L'intérêt du mélange matériau granulaire et fils est, comme le montrent les essais triaxiaux, de faire travailler simultanément les deux composants de la résistance, qui sont le frottement du milieu granulaire et l'étreinte produite par le réseau de fils. Les essais montrent en effet que le mélange possède le même angle de frottement que le matériau granulaire de base sans fils ; en outre une cohésion importante apparaît, de l'ordre de 100 kPa pour un dosage 0,1 % de fil polyester standard. Cette cohésion est considérable puisqu'elle suffit à assurer la stabilité d'une paroi verticale de 10 m de hauteur avec un très bon coefficient de sécurité.

Les possibilités offertes par le jumelage d'un angle de frottement de 35 à 40 ° et d'une cohésion de 100 ou 200 kPa sont en fait très remarquables. Elles ne sont pas toujours perçues immédiatement par les géotechniciens car il n'existe aucun matériau naturel qui ait à la fois ces deux atouts.

Le mélange sable + fil a donc, en résumé, le comportement d'un sol (les déformations à la rupture sont de 6 à 10 % environ et parfois davantage), avec une cohésion très élevée.

Du point de vue hydraulique, le mélange est aussi perméable que le sol naturel de base.

On obtient donc un matériau résistant, non rigide et

perméable. L'association de ces propriétés n'existe dans aucun des matériaux actuellement à la disposition de l'ingénieur. C'est la raison pour laquelle cette technique offre des possibilités tout à fait nouvelles.

Nous présentons ci-dessous quelques résultats d'essais triaxiaux, afin d'illustrer les propriétés mécaniques du matériau.

ESSAIS TRIAXIAUX

Les essais triaxiaux cités ci-dessous ont été faits sur des éprouvettes $\phi = 100$ mm H = 200 mm fabriquées en laboratoire avec un dispositif approprié. Après fabrication les éprouvettes sont compactées sur table vibrante ; les essais sont faits à l'état saturé, du type consolidé drainé à la vitesse de 0,085 mm/minute. Ils ont été réalisés par le Centre d'études techniques de l'équipement (CETE) de Rouen.

Les fils utilisés pour tous ces essais sont des fils multibrins polyester sans torsion.

1 - Sable 0/5 mm - Fil 330 dtex

Le sable est un sable semi-concassé 0/5 mm sans fines, $D_{50}=0,8$ mm; d'angle de frottement 43° avec une déformation axiale pour le déviateur maximal de l'ordre de 5 %.

Le fil est un fil de 330 dtex 60 filaments (titre du filament : 5,5 dtex), tenacité 36 cN/tex, allongement à la rupture 25 %. Le dosage pondéral moyen est de 0,2 %. Les essais ont été faits pour quatre valeurs de l'étreinte latérale effective σ_3^l : 50, 100, 150 et 200 kPa. La masse volumique sèche était 1,90 g/cm³. Les résultats sont donnés dans le tableau 1 ci-dessous. Le calcul de la cohésion résultant de la présence des fils est fait de deux façons différentes :

- pour chaque valeur de σ_3^l on calcule la cohésion en admettant que l'angle de frottement du mélange est le même que celui du sable initial, soit 43° ,
- pour l'ensemble des valeurs de σ_3^l on détermine l'enveloppe qui donne les valeurs de ϕ et de c du mélange.

Tableau 1 - Résultats d'essais triaxiaux
Sable 0/5 mm Fil 330 dtex

Dosage %	σ_3^l kPa	$(\sigma_1 - \sigma_3^l)_{max}$ kPa	C pour $\phi=43^\circ$ kPa	ϕ et c d'ensemble	ϵ_{1R} %
2,09	50	1 338	244	$\phi=48^\circ$ c=190 kPa	7,2
1,89	100	1 611	257		7,2
1,82	150	1 797	250		7
2,09	200	2 260	305		6,8
moyenne 1,97			moyenne 264		

2 - Sable 0/2 mm - Fil 167 dtex

Il s'agit d'un sable naturel 0/2 mm avec 10 % de fines (inférieures à 80 microns) et un D_{50} de 0,3 mm.

Le fil est de 167 dtex 30 filaments, tenacité 36 cN/tex, allongement à la rupture 26 %. Le dosage pondéral moyen est de 0,14 %. La contrainte latérale a trois valeurs : 50, 100 et 150 kPa. La masse volumique sèche initiale est de 1,59 g/cm³.

Les résultats sont dans le tableau 2.

Tableau 2 - Résultats d'essais triaxiaux
Sable 0/2 mm Fil 167 dtex

Dosage %	σ_3^l kPa	$(\sigma_1 - \sigma_3^l)_{max}$ kPa	c pour $\phi=37^\circ$ kPa	ϕ et c d'ensemble	ϵ_{1R} %
1,37	50	713	141	$\phi=38^\circ$ c=134 kPa	16
1,43	100	903	151		14
1,40	150	1 028	145		16
moyenne 1,40			moyenne 146		

3 - Sable 0/0,3 mm - Fil 50 dtex

Il s'agit d'un sable naturel à granulométrie très étroite 0,1/0,3 mm, $D_{50}=0,2$ mm, sans fines, d'angle de frottement $\phi=36^\circ$, γ_d , OPN=1,60. Le fil est un 50 dtex 16 filaments (titre du filament 3,1 dtex), tenacité 40 cN/tex, allongement à la rupture 25 %.

Le dosage pondéral moyen est de 0,215 %. La masse volumique sèche est 1,62 g/cm³.

Les résultats sont sur le tableau 3.

Tableau 3 - Résultats d'essais triaxiaux
Sable 0/0,3 mm Fil 50 dtex

Dosage %	σ_3^l kPa	$(\sigma_1 - \sigma_3^l)_{max}$ kPa	ϕ et c d'ensemble
2,34	50	1 599	$\phi=36^\circ$ c=356 kPa
2,09	100	1 528	
2,01	150	1 895	
moyenne 2,15			

La figure 1 montre la courbe effort-déformation obtenue dans l'un des essais de cette troisième série.

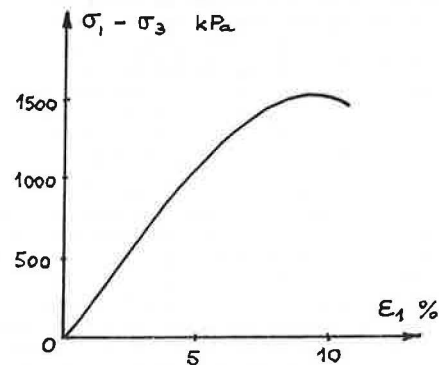


Figure n° 1 - Exemple de courbes effort-déformation obtenue par essai triaxial

Les résultats présentés, ainsi que de nombreux autres, montrent l'importance de la cohésion obtenue par le mélange intime fil-sol. En divisant la cohésion par le dosage pour la ramener à la valeur uniforme de 0,1 %, on trouve une valeur proche de 100 kPa pour les premiers cas cités et une valeur de 165 kPa pour le troisième.

Dans le premier cas et dans l'hypothèse $\phi=43^\circ$ on trouve une moyenne de $264 : 1,97 = 134$ kPa. Ces valeurs sont beaucoup plus élevées que celles obtenues par Mc Gown et al (2) avec des éléments de grille incorporés au sol, les valeurs de cohésion indiquées étant de l'ordre de 50 kPa pour un dosage pondéral de 0,18 %, ce qui donnerait 25 à 30 kPa en se ramenant au dosage de référence de 0,1 %.

APPROCHE THÉORIQUE

Il est intéressant de comparer aussi les valeurs obtenues à celles que permettent d'évaluer une approche théorique.

Le principe est d'admettre un réseau de fils isotrope (bien que le matériau puisse être anisotrope dans la pratique) et de supposer que les fils sont tous à la limite de rupture. La somme des tensions des fils crée une contrainte isotrope H ; la cohésion obtenue est $c = H \operatorname{tg} \phi$.

Le calcul de H implique de déterminer, en fonction du titre du fil et du dosage pondéral, le nombre de fils par unité d'angle solide, puis de faire la somme des tensions. On aboutit à la relation suivante établie avec la collaboration de C. Stéfani, du service de mécanique du Laboratoire central des ponts et chaussées :

$$H = \frac{1}{3} 10^7 m \gamma t$$

avec H en pascals

m = dosage pondéral en fil (sans dimension)

γ = masse volumique du sol en g/cm^3

t = tenacité du fil (résistance par unité de titre) en cN/tex .

Ex. : Avec $m = 0,1 \% = 10^{-3}$
 $\gamma = 1,8 \text{ g/cm}^3$
 $t = 50 \text{ cN/tex}$

on obtient $H = 300$ kPa.

Pour un angle de frottement $\phi = 35^\circ$, $\operatorname{tg} \phi = 0,7$ et on a $c = 0,7 H = 210$ kPa.

Cette valeur théorique, obtenue par un calcul fait dans des conditions idéalisées, est bien de l'ordre de grandeur des valeurs expérimentales trouvées. Il est à souligner que la rupture par essai triaxial des éprouvettes de matériau compact se produit bien avec rupture des fils le long de la surface de rupture de l'éprouvette.

CHANTIER AUTOROUTE A7 : PRÉSENTATION DU PROJET

L'accroissement continu du trafic sur l'artère vitale constituée par l'autoroute A7 nécessite l'élargissement de 2×2 à 2×3 voies du tracé entre Lyon et Valence. La section concernée se développe sur 75 km, les travaux étant réalisés par tronçons d'une dizaine de km, à raison d'un tronçon lancé chaque année.

En l'absence de terre-plein central large, l'élargissement doit se faire par l'extérieur en raidissant les pentes de talus de déblai ou remblai, afin d'éviter tout accroissement d'emprise de l'autoroute nécessitant des procédures foncières longues et coûteuses.

Tant pour les remblais que pour les déblais dans le sol en place, des soutènements s'avèrent alors indispensables pour assurer la stabilité de l'ouvrage.

La solution Texsol a été retenue par le maître d'oeuvre, en variante des murs de béton classiques, pour la plupart des murs de soutènements de déblai de la section Tain L'Hermitage-La Galaure.

Environ 20 000 m^3 de Texsol sont mis en oeuvre sur ce tronçon en 2 tranches de travaux réparties sur les mois d'hiver 1984/85 et 1985/86, ce chantier constituant ainsi la première réalisation mondiale utilisant ce nouveau procédé à cette échelle.

ÉTUDE DE LA SOLUTION TEXSOL

Pour les sections en déblai, la solution de base de l'appel d'offres consistait à placer des murs de soutènement en béton en T renversé avec l'obligation d'excaver les talus sur une grande largeur, comme on peut le constater sur la partie gauche de la figure n° 2. Toutes les variantes étaient toutefois autorisées, dans la mesure où elles respectaient les contraintes suivantes :

- rapidité d'exécution des travaux,
- bonne intégration à l'environnement naturel tout en préservant au maximum la végétation existante sur les talus existants,
- nécessité de réaliser les travaux tout en maintenant l'autoroute en service,
- et bien sûr économie par rapport à la solution de base ou aux autres solutions concurrentes.

C'est donc sur ces bases qu'une solution Texsol a été étudiée, selon le schéma de la partie droite de la figure n° 2, en sachant en outre que le terrain terrassé en déblai présentait une stabilité suffisante à court terme, et que le matériau sableux nécessaire pour constituer le Texsol se trouvait disponible à proximité du site.

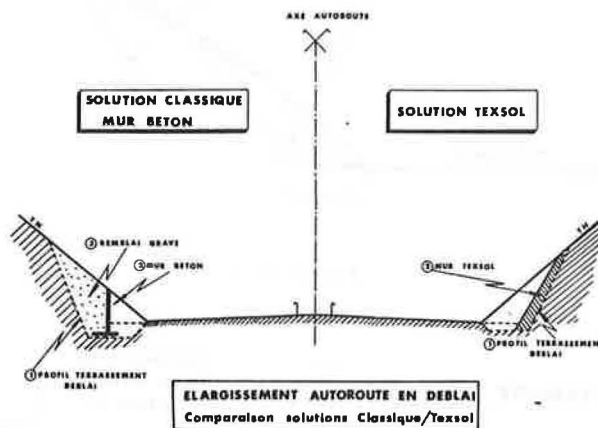


Figure 2

Les phases successives de cette étude ont été les suivantes :

1 - Détermination de la géométrie du soutènement

De façon à dégager l'emprise de la 3^e voie, il a été proposé de réaliser des massifs de Texsol appliqués contre les talus de déblais préalablement terrassés, possédant les caractéristiques suivantes :

- angle du parement extérieur du mur par rapport à l'horizontale : 60° ,
- niveau de fondation : encastrement d'environ 50 cm par rapport au fil d'eau de la cunette future du pied de talus,
- hauteur variable suivant les murs, comprise entre 3 et 7 m,
- épaisseur au sommet : 0,55 m, mesurée horizontalement,
- épaisseur à la base : définie selon les calculs de la stabilité de l'ensemble Texsol-talus de déblai.

Ces calculs ont été effectués sur ordinateur à l'aide du programme "Talus" qui permet de calculer les coefficients de sécurité du Bishop simplifiés et de Fellenius au glissement circulaire selon la méthode des tranches.

A partir des caractéristiques du terrain en place, résultant de l'étude de sol préliminaire (formations sablo-limoneuses mollassiques de cohésion nulle et d'angle de frottement interne compris entre 35° et 40° à long terme), de caractéristiques supposées du Texsol (cohésion de 100 kPa et angle de frottement interne de 36°), il a été déterminé pour chaque mur l'épaisseur minimale de Texsol à mettre en pied pour assurer un coefficient de sécurité supérieur à 1,5.

Sur la première tranche de travaux, cette épaisseur a varié de 0,80 m à 1,80 m.

On trouvera sur la figure n° 4 un exemple de dimensionnement type, avec les valeurs des coefficients de sécurité, à comparer avec celles existant avant élargissement apparaissant sur la figure n° 3.

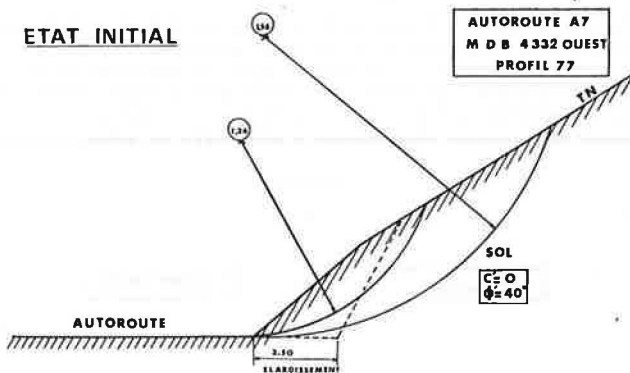


Figure n° 3

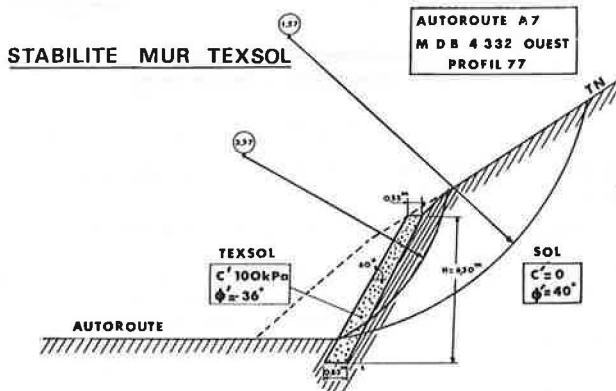


Figure n° 4

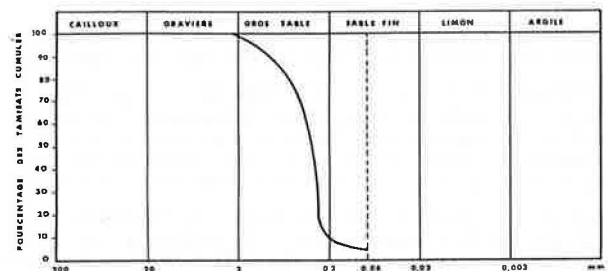
2 - Détermination des paramètres du Texsol

Comme on l'a vu au paragraphe précédent, la démarche consiste généralement à se fixer une valeur de cohésion du Texsol permettant a priori un dimensionnement économique de l'ouvrage, et que l'on sait pouvoir être atteint normalement par le procédé, et d'effectuer les calculs de stabilité de l'ouvrage sur cette base.

Il est donc impératif de réaliser par ailleurs une étude de laboratoire permettant, pour un sable d'apport donné, de déterminer la nature du fil et le dosage à utiliser pour atteindre la cohésion requise.

Avec le sable disponible, dont la courbe granulométrique est donnée en figure n° 5, plusieurs séries d'essais de compression simple et d'essais triaxiaux ont été effectuées selon la méthodologie décrite dans la première partie de cet article.

ANALYSE GRANULOMETRIQUE



CHANTIER: A7 VALENCE

TEXSOL

Figure n° 5

Les figures n° 6 et 7 présentent respectivement les résultats des essais de compression simple et d'un essai triaxial, qui ont conduit à retenir du fil polyester 167 décitex 30 brins dosé à 1,5 pour mille.

COHESION (pour $\beta=30^\circ$)

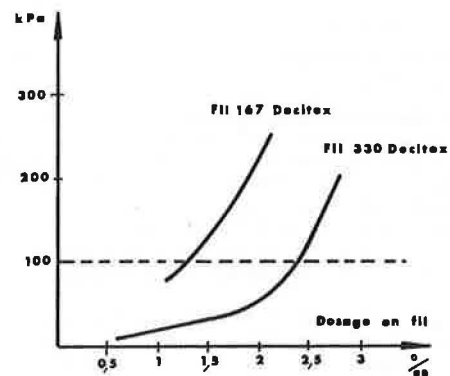


Figure n° 6

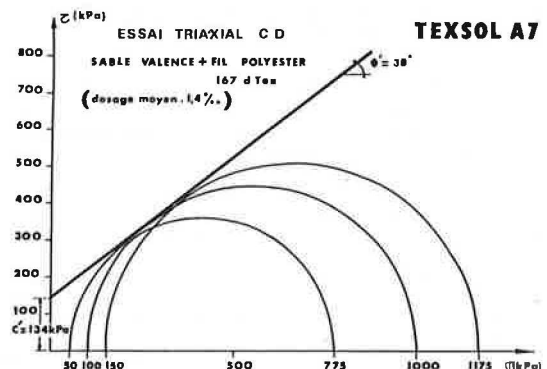


Figure n° 7

RÉALISATION DES MASSIFS DE SOUTÈNEMENT EN TEXSOL

Les différentes phases de travaux se sont enchaînées de la façon suivante :

1 - Terrassement du talus

La première opération consiste donc à venir terrasser le talus de déblai suivant le profil interne du futur mur de Texsol. Cette opération réalisée par l'entreprise générale, n'a pas posé de problème particulier, puisque le terrain naturel présentait à court terme une stabilité suffisante. La variante Texsol est de plus une des solutions permettant de minimiser ces terrassements.

2 - Mise en oeuvre du Texsol

Compte tenu de la nouveauté du procédé et des conditions particulières de réalisation, une machine entièrement originale a dû être conçue et fabriquée pour ces travaux. Celle-ci se compose d'une unité de transport de sable, d'un système d'éjection des fils et d'un porteur assurant ses déplacements, dont une vue d'ensemble est donnée sur les figures n° 8 et n° 10.

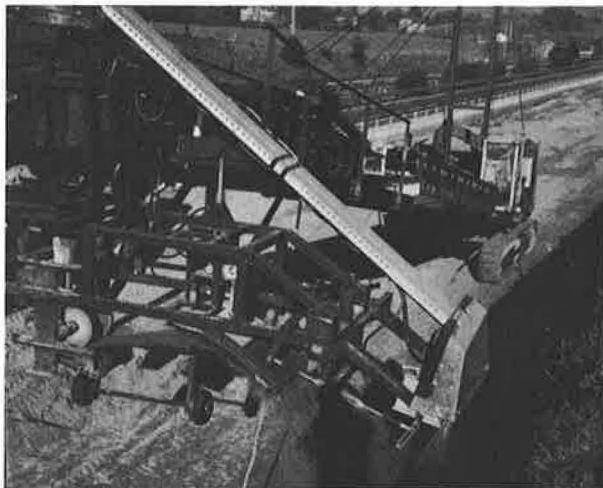


Figure n° 8 - Vue d'ensemble de la machine

Chaîne sable : Le sable est chargé dans une trémie de 2 m³ environ. Un extracteur doseur permet l'alimentation en sable avec un débit contrôlé et réglable. Le matériau est repris par un tapis intermédiaire alimentant le tapis principal suspendu et réglable en hauteur permettant l'élevation du matériau jusqu'en haut du talus.

Chaîne fil : Le fil de 167 dtex est stocké dans deux cantres de 20 bobines fixés latéralement sur la flèche que l'on peut voir sur la figure n° 9. Compte tenu du débit désiré, du dosage et des vitesses admissibles, elles se dévident simultanément. Les fils sont tractés par des éjecteurs courants de l'industrie textile, le fluide moteur étant de l'eau sous pression. Entre les cantres et les buses d'éjection, le fil est protégé par des conduits tubulaires.

Mélange fil sable : En bout de tapis, le sable tombe dans la goulotte du projecteur et est accéléré sur un tapis à grande vitesse. La veine de sable ainsi projetée en direction du talus est "cassée" par un bouclier à mouvement alternatif pour retomber en pluie sur l'endroit à traiter. Au niveau du bouclier, une dizaine de buses injectent le fil textile à environ 20 m/s dans la pluie de sable assurant ainsi un mélange homogène adapté (voir figure n° 10).

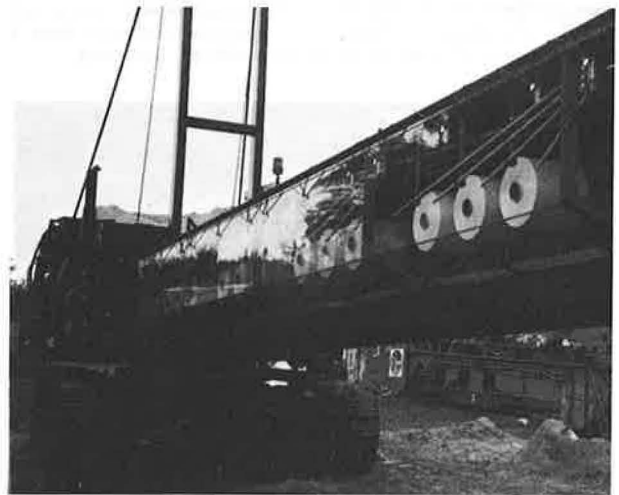


Figure n° 9 - Vue des bobines de fil sur la flèche de la machine

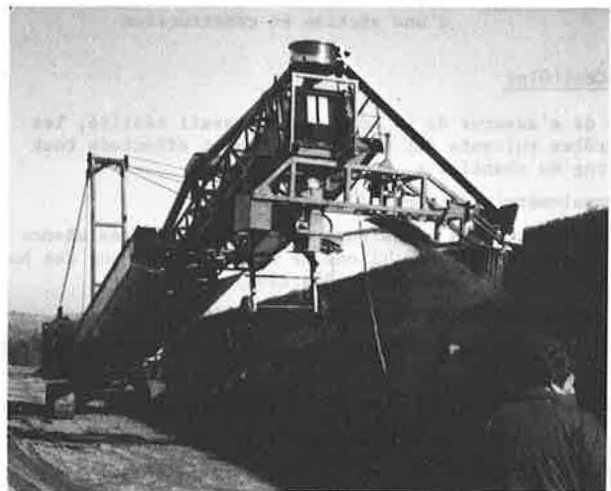


Figure n° 10 - Vue de la machine au travail

Production :

La réalisation du mur de Texsol se fait par couches de 5 à 10 cm, la texoleuse de déplaçant parallèlement au pied du talus avec une vitesse moyenne de 5 m/mn.

En fonction de la hauteur des couches, on s'ajuste sur la zone à traiter par une levée de flèche et une rotation combinée de la tourelle et de l'ensemble mélangeur.

Le mur est exécuté par tranches de longueurs comprises entre 40 et 50 m, raccordées entre elles en biseau.

La pente du talus à obtenir est matérialisée à l'aide de gabarits fixes implantés régulièrement le long du talus.

Un compactage par couches de Texsol est réalisé à l'aide d'une plaque vibrante jusqu'à 1,50 m de hauteur par rapport au pied du talus.

Le dosage sable-fil est réglable soit par le débit de l'alimentation dusable, soit par le débit du fluide tractant le fil.

L'approvisionnement en sable se fait à l'arrière du porteur par une chargeuse sur pneumatique.

La photographie de la figure n° 11 présente une vue d'ensemble de l'atelier de Texsol en cours de travail, dont le rendement moyen s'établit à environ 100 m³ par jour.



Figure n° 11 - Vue du chantier montrant l'extrémité d'une section en construction

3 - Contrôles

Afin de s'assurer de la qualité du travail réalisé, les contrôles suivants ont été régulièrement effectués tout au long du chantier :

- granulométrie du sable d'apport,
- caractéristiques mécaniques du fil utilisé (résistance à la rupture d'échantillons de fils prélevés sur des bennes ou sur le mur après éjection),
- dosages respectifs de sable et fils,
- contrôles de densité de Texsol (90 % de l'Optimum Proctor Normal),
- contrôles topographiques de la géométrie du mur,
- mesures de déformation du massif du Texsol.

Tous ces contrôles se sont révélés satisfaisants.

4 - Végétalisation du talus

Une fois le mur achevé, la végétalisation du mur en Texsol peut intervenir, avec le double objectif d'assurer une protection de l'état de surface du parement et surtout celui de permettre une meilleure intégration de l'ouvrage dans son environnement naturel.

Un essai d'engazonnement par projection a été réalisé sur le mur expérimental en carrière. Il a permis d'aboutir à la composition d'un mélange de semences et de bouillie végétale enrichie permettant de développer une végétation sur le support a priori stérile et drainant, constitué par le Texsol.

On trouvera en figure n° 12 une vue du mur d'essai en carrière quelques mois après son engazonnement et en figure n° 13 une vue de murs de l'autoroute quelques semaines après engazonnement.

Des apports complémentaires d'engrais seront sans doute nécessaires pour assurer la pérennité de cette végétation, mais on peut voir que l'intégration des murs de Texsol dans l'environnement est déjà très bonne et en tout cas très supérieure à celle de toutes les autres solutions comportant du béton.

D'autres solutions de végétalisation par mise en place de nappes de paille, matelassées et préensemencées sont également envisagées et à l'étude.



Figure n° 12



Figure n° 13

BIBLIOGRAPHIE

- (1) Leflaive E. "Le renforcement des matériaux granulaires avec des fils continus", II^e congrès international des géotextiles, Las Vegas, U.S.A., pp. 721-726, 1982.
- (2) Mc Gown A., Andrawes K.Z., Hytiris N., Mercer F.B., "Soil strengthening using randomly distributed mesh elements", 11^e congrès international de mécanique des sols et des travaux de fondations, San Francisco, U.S.A., pp. 1735-1738, 1985.