# UN NOUVEAU SYSTEME DE STABILISATION DE TALUS : LES FILETS HAUTE LIMITE ELASTIQUE, UNE ALTERNATIVE AU BETON PROJETE

Rudolf RÜEGGER, Daniel FLUM, Nicolas MAGNE 1 RÜEGGER système, RÜEGGER Rudolf, Saint Gall, Suisse 2 GEOBRUGG, Daniel FLUM, Romanshorn, Suisse 3 GEOP, Nicolas MAGNE, Veyrier du Lac, France

**RESUME** : Ce système, destiné à remplacer les ouvrages béton projeté ou coulé, est un filet simple torsion constitué d'un fil très résistant et associé à des ancrages. Il peut reprendre des efforts très important et les transmettre aux ancrages contrairement au grillage ordinaire. Il est dimensionné à l'aide d'un logiciel spécifique et présente l'avantage de s'intégrer dans le paysage grâce à une mise en végétation du site.

## 1 Introduction :

Aujourd'hui pour stabiliser par clouage des talus en terrains meubles ou en rocher altéré plusieurs solutions sont possibles :

- Réaliser des ouvrages en béton coulée ou projeté
- Mettre en place des filets métalliques plaqués souples

Les principaux avantages des systèmes souples par rapport aux ouvrages en béton projeté sont d'ordre esthétique et économique. Il est possible de revégétaliser le talus et donc de limiter l'impact visuel de l'ouvrage dans le paysage. Par ailleurs le coût de la fourniture, la facilité et la rapidité de pose en font un produit économiquement intéressant.

Parmi les systèmes souples existants, les moins résistants sont les grillages classiques (simple ou double torsion disponibles sur le marché avec une nuance d'acier en général de 450 N/mm<sup>2</sup>). Ils sont bien souvent incapables de reprendre les efforts exercés par le terrain et les transmettre aux ancrages.

Jusqu'à présent, on utilisait des filets de câbles doublé de grillage, mais leur mise en œuvre reste fastidieuse et le câble est particulièrement sensible à la corrosion.

La mise au point d'un nouveau treillis en acier de limite élastique comprise entre 1770 et 2020 N/mm<sup>2</sup> est une solution efficace pour la stabilisation des pentes. Il peut être dimensionné grâce à des logiciels adaptés pour une application en terrain meuble ou en rocher altéré. Il est associé à un clouage traditionnel et peut reprendre des efforts très importants en tête de clous (supérieur à 200 kN) et assurer un confinement des terrains de surface, (mise en tension des filets sur le talus lors de leur pose).

## 2 UN FILET HAUTE LIMITE ÉLASTIQUE COMME SYSTÈME DE PROTECTION DES TERRAINS DE SURFACE

L'entreprise Fatzer AG, Geobrugg, Protection systems, à Romanshorn en Suisse a développé ce filet en acier haute limite élastique qui est commercialisé sur le marché sous le nom de TECCO<sup>®</sup>. Il se compose d'une version standard d'un fil en acier d'épaisseur 3mm protégé contre la corrosion par une couche d'un alliage Zn-Alu (supercoating). Les mailles en forme de losanges de 83 mm x 143 mm sont produites par une machine simple torsion. La résistance à la traction est de 155 kN/m dans le sens longitudinal et 75 kN/m dans le sens transversal. Sa forme tridimensionnelle permet une transmission optimale des efforts du terrain sur le filet et facilite l'ensemencement par projection pour la végétalisation.

Comparé à un grillage classique présentant des dimensions de fils et de mailles semblables, ce filet, à haute limite élastique peut reprendre des efforts environ 3 fois plus importants. Le filet

#### R. Rüegger et al.

TECCO<sup>®</sup> (*fig. 1*) une fois déroulé dans la pente est fixé aux ancrages à l'aide de plaques à griffes en forme de losange adaptées au système. Ces plaques permettent une précontrainte très importante au niveau des ancrages et donc sur le terrain. Les ancrages sont disposés en quinconce pour une meilleure répartition des efforts, limitant à une largeur a et une longueur 2b les zones pouvant glisser, a et b étant l'espacement horizontal et vertical des ancrages (*fig. 2*).



Figure 1: le filet TECCO<sup>®</sup>



*Figure 2*: Profil général avec disposition en quinconce des ancrages

# 3 *RUVOLUM* : LE LOGICIEL DE DIMENSIONNEMENT EN TERRAINS MEUBLES OU EN ROCHER ALTÉRÉ

RUVOLUM<sup>®</sup> est un logiciel de dimensionnement pour des systèmes de stabilisation des terrains de surface constitués d'un filet métallique associé à un système d'ancrages en terrains meubles ou en rocher altéré. Ce logiciel peut s'appliquer à d'autres systèmes techniquement comparables à condition que les résistances ultimes des filets utilisés soient connues ou déterminées par des essais (cf. chapitre 4).

RUVOLUM<sup>®</sup> fait l'analyse de deux types d'instabilité, l'une parallèle à la pente sur l'ensemble du talus (*fig. 3*) et l'autre localisée entre les ancrages (*fig. 5*). L'influence des pressions interstitielles des nappes phréatiques, des tremblements de terres etc. ne sont pas pris en compte dans la présente version.

# 3.1. Etude d'une instabilité parallèle à la surface du talus

La surface instable est reprise comme une seule unité à l'aide du système d'ancrage. Une tranche de terrain de longueur b, largeur a et épaisseur t est ainsi correctement fixé par les ancrages.



Figure 3: Instabilité superficielle

parallèle à la pente



Figure 4: Ensemble des forces agissant sur un élément cubique

En considérant l'équilibre des forces comme illustré figure 4 et en tenant compte d'un critère de rupture type Mohr-Coulomb, on peut formuler, l'équation générale suivante pour l'effort de cisaillement: G, V,  $\alpha$ ,  $\psi$ ,  $\phi$ , C et A sont les paramètres géométriques et géotechniques.

<b>S</b> [kN] =	1 / $\gamma_{mod} \cdot \{ \gamma_{mod} \cdot \mathbf{G} \cdot \sin \alpha - \mathbf{V} \cdot \gamma_{mod} \cdot \cos (\Psi + \alpha) \}$	Equation 1
$- c \cdot A - [G \cdot cos \alpha + V \cdot sin (\Psi + \alpha)] \cdot tan \phi \}$		

La poussée S est reprise par l'ancrage puis transmise au terrain stable. V représente la force de précontrainte du système, G le poids propre et N et T les forces de réaction du terrain. La force 'c·A' représente la cohésion le long de la surface de glissement, incliné d'un angle  $\alpha$  par rapport à l'horizontal. On ne tient pas compte d'éventuelles pressions interstitielles ou nappe phréatique qui pourraient s'appliquer sur la couche instable.

Le logiciel de dimensionnement RUVOLUM<sup>®</sup> se base sur le principe de coefficients de sécurité partiels énoncés par l'Eurocode 7. Les paramètres géotechniques (angle de frottement, cohésion, et poids volumique de la couche instable) sont pondérés par des coefficients de sécurité  $\gamma_c$ ,  $\gamma_{\phi}$  et  $\gamma_{\gamma}$ .

De ceci résultent les valeurs des paramètres géotechniques  $\varphi_d$ ,  $c_d$  et  $\gamma_d$ . De même  $V_d$  est obtenue en pondérant la force de précontrainte V d'un coefficient appelé facteur de charge. Enfin un coefficient de sécurité sur le modèle  $\gamma_{mod}$  est appliqué prenant en compte la géométrie et les incertitudes du modèle.

Dans le cas d'un glissement parallèle à la surface du talus, il faut faire trois vérifications de capacité de résistance:

- 1. Vérification de la résistance du clou au cisaillement
- 2. Vérification de la résistance du filet au poinçonnement
- 3. Vérification de la résistance du clou aux charges combinées

## 3.2. Etude d'une instabilité localisée entre les différents ancrages

Dans une deuxième analyse, des tranches susceptibles de glisser entre les ancrages vont être prises en considération. Le système de stabilisation 'filet métallique associé à un système d'ancrages' doit être dimensionné de manière à retenir tout type d'élément localisé pouvant glisser, les efforts maximaux étant repris et transmis par les ancrages au terrain sous-jacent stable (*fig. 5, 6, 8 et 9*).





Figure 5: Instabilités locales entre ancrages

*Figure 6:* Disposition générale des ancrages

En amont de chaque clou, se trouve une zone d'une largeur a et d'une longueur 2b qui doit être protégée contre les instabilités locales.

Au départ de cette zone, tout élément susceptible de glisser peut être retenu. Pour cela, on prend en compte l'élément le plus défavorable afin d'obtenir une sécurité maximale. Le filet est précontraint au niveau des têtes d'ancrages jusqu'à une force V, en serrant les écrous sur les plaques à griffes qui vont être plaquées sur le sol.

R. Rüegger et al.

A partir de la tête d'ancrage, cette précontrainte sollicite un cône de pression sous la plaque à griffe et sous le filet qui peut être défini par les paramètres géométriques  $\zeta$ ,  $\xi$  et t. L'angle  $\delta$  représente l'inclinaison du cône par rapport à l'horizontal (*fig. 7*).

Le paramètre  $\zeta$  dépend de la plaque à griffe, du filet utilisé et du terrain et peut être déterminé par des essais. Par simplification, on peut prendre pour hypothèse  $\zeta_{mm} = 0.5 D_{plaque}$ . Le modèle de dimensionnement suppose que les éléments étudiés se situent en dehors du cône de pression. Ainsi l'élément instable le plus défavorable a une forme trapézoïdale de grande largeur a-2. $\zeta$ , de petite largeur

a-2· $\xi$  =  $\eta$  et d'épaisseur t. Pour simplifier on prendra une largeur a<sub>red</sub> = a- t/tan $\delta$  -2· $\zeta$  et une épaisseur t (*fig. 7*).

L'élément instable étudié a une largeur a<sub>red</sub>, une longueur maximale 2b et une épaisseur t.

Lors de la vérification de la stabilité locale, il est impératif de faire varier sur tout l'intervalle [0,t], l'épaisseur de la couche instable et ainsi déterminer le mécanisme de rupture le plus défavorable.

Lors de la vérification de la stabilité locale on peut différencier deux mécanismes de rupture: le mécanisme A (cf. *fig. 8*) qui prend en compte un seul élément instable et le mécanisme B (cf. *fig. 9*) qui prend en compte deux éléments instables.





*Figure 7: Coupe transversale de l'élément instable* le plus défavorable



Les relations présentent dans les équations 2, 3 et 4 résultent de considérations d'équilibre et prend en compte le critère de rupture de type Mohr-Coulomb, ainsi qu'un facteur de correction  $\gamma_{mod}$  lié à l'incertitude du modèle. La force maximale P est déterminée en faisant varier l'inclinaison de la surface de glissement  $\beta$ .

$$\mathbf{P} [\mathsf{kN}] = \frac{G \cdot [\gamma_{\mathsf{mod}} \cdot \sin \beta - \cos \beta \cdot \tan \phi] - \dots}{\gamma_{\mathsf{mod}} \cdot \cos (\beta + \Psi) + \sin (\beta + \Psi) \cdot \tan \phi}$$
Equation 2
$$\frac{Z \cdot [\gamma_{\mathsf{mod}} \cdot \cos (\alpha - \beta) - \sin (\alpha - \beta) \cdot \tan \phi] - c \cdot A}{\gamma_{\mathsf{mod}} \cdot \cos (\beta + \Psi) + \sin (\beta + \Psi) \cdot \tan \phi}$$

**X** [kN] = 1 /  $\gamma_{mod}$  · { G<sub>I</sub> · ( $\gamma_{mod}$  · sin  $\alpha$  – cos  $\alpha$  · tan  $\phi$ .)- c · A<sub>I</sub> }

Equation 3

$$\mathbf{P} [kN] = \frac{G_{II} \cdot [\gamma_{mod} \cdot \sin \beta - \cos \beta \cdot \tan \phi] + ...}{\gamma_{mod} \cdot \cos (\beta + \Psi) + \sin (\beta + \Psi) \cdot \tan \phi}$$

$$\dots (X - Z) \cdot [\gamma_{mod} \cdot \cos (\alpha - \beta) - \sin (\alpha - \beta) \cdot \tan \phi] - c \cdot A_{II}$$

$$\gamma_{mod} \cdot \cos (\beta + \Psi) + \sin (\beta + \Psi) \cdot \tan \phi$$



*Figure 9:* Mécanisme de rupture B (on néglige le frottement possible le long de la surface de contact entre les 2 éléments instables. P et Z sont les forces extérieures appliquées aux éléments et X la force de contact.)

Tableau des notations pour les équations 1 à 4 :

γmod	Coefficient de sécurité partiel sur la méthode	
G	Poids spécifique du sol	
V	Précontrainte appliquée au système	
α	Inclinaison du talus par rapport à l'horizontal	
Ψ	Inclinaison des clous par rapport à l'horizontal	
φ	Angle de frottement du sol	
β	Inclinaison de la surface de glissement par rapport à l'horizontal	
CA	cohésion selon la surface de glissement	

On prend ensuite la valeur maximale de la force P obtenue soit par le mécanisme de rupture A soit par le mécanisme de rupture B. Enfin lors de l'étude de cette stabilité locale entre ancrages on vérifie:

- 1. la résistance du filet au cisaillement aux bords de la plaque à griffes
- 2. la transmission de la force Z du filet vers les ancrages.

#### 3.3. Vérification complémentaire de la stabilité globale

En général, en complément de ce dimensionnement, on fait une vérification de la stabilité globale en considérant des surfaces de glissement profondes et si nécessaire on modifie le système d'ancrages.



*Figure 10:* Etude de la stabilité globale enconsidérant une surface de glissement profonde

## 4 ESSAIS POUR DÉTERMINER LA RÉSISTANCE A LA RUPTURE DU FILET TECCO®

Les résistances suivantes du filet doivent être connues pour établir les vérifications aux états limite ultimes.

- 1. Résistance du filet au poinçonnement dans la direction des ancrages
- 2. Résistance du filet à un effort traction parallèle à la pente
- 3. Résistance du filet au cisaillement sur le bord supérieur de la plaque = 50 % de la résistance au poinçonnement

Les figures 11 12 13 et 14 montrent les résultats des 3 différents essais réalisés à la traction et au poinçonnement



*Figure 11:* Résistance sous charges déterminées par des essais de traction



*Figure 13:* Résistance sous charges déterminées par des essais de poinçonnement



*Figure 12 :* courbes effort de traction - déplacement



- = filet TECCO: résistance à la traction 155 kN/m
- II = filet à maille hexagonal conventionnel, résistance à la traction appr. 50 kN/m
- III = géogride en polyester PÉT, résistance à la traction appr. 40 kN/m
- IV = essais uniquement avec une plaque à griffe

*Figure 14:* courbes effort de poinçonnement-déplacement

# 5 Exemple sur la RD 520C dans le massif de la Chartreuse en Isère

En janvier 2002, un glissement de terrain a atteint la RD 520C à hauteur du Pas du Frou (Chartreuse/Isère).

L'étude a proposé la mise en place d'un filet plaqué TECCO

Les travaux ont été effectués en 2 tranches fin 2002 et début 2004



Figure 15 : profil général

## Stabilisation de pente par pose de filet TECCO<sup>®</sup> plaqués et ancrés

Hauteur du talus :50 mInclinaison : $42^{\circ}$ Filets :Système TECCO<sup>®</sup>Paque à griffes :Système TECCO<sup>®</sup>Clous :ICHEBECK 30/11Longueur des clous :4 à 6 mlMaillage :1 clou tous les 10 m²Précontrainte :V = 50 kN



*Figure 16* : glissement de terrain survenu en janvier 2002



*Figure 19* : mise en tension du filet TECCO<sup>®</sup> à l'aide d'une plaque à griffe



Figure 17 : talus sécurisé



*Figure 20* : détail de pose des agrafes de liaisons

*Figure 18* : après la mise en place du système TECCO<sup>®</sup>



*Figure 21* : vue plongeante du site

# 6 EXEMPLE A MÜHLHEIM EN ALLEMAGNE

Un talus a été sécurisé à Mühlheim en Allemagne au printemps 2000 par le système TECCO combiné par des clous GEWI D = 28 mm. Il s'agit d'un problème de glissement de la couche de couverture (glaise et gravats) puis d'éboulements de pierre et de blocs venant des zones rocheuses. La zone entière fait environ 440 m de long par 12 m de haut. L'inclinaison du talus rocheux dans sa partie inférieure est de 70 degrés et d'environ 45 degrés dans sa partie supérieure. A part des zones en roche dure le talus a été mis en végétation



Figure 22 : Profil général



Figure 23 : Exécution des forages





Figure 24 : Pose du treillis



Figure 26 : Talus sécurisé, zone rocheuse

*Figure 25 :* Talus sécurisé avec TECCO et clouage juste après la mise en place



*Figure 27* : Talus sécurisé, partiellement végétalisé

## 7 CONCLUSIONS :

Le système TECCO<sup>®</sup> est composé d'un filet métallique haute limite élastique, de plaques d'ancrages spécifiques, et d'agrafes de liaison.

Associé à des ancrages passifs, il permet le confortement de talus et se place en alternative aux parois clouées en béton projeté. Il résulte d'un dimensionnement qui justifie la longueur le diamètre et l'espacement des ancrages.

Mis en végétation, le talus ainsi stabilisé est discret et s'intègre parfaitement dans la nature. Par ailleurs le revêtement en alliage Zinc/Alu mis en place sur le fil, en protection contre la corrosion lui confère une durée de vie d'une centaine d'année.

## 8 REFERENCES :

Rüegger, R. ; Flum, D. ; Haller, B.: Hochfeste Geflechte aus stahldraht für die Oberflächensicherung in Kombination mit Vernagelungen und Verankerungen (Ausführliche Bemessungshinweise). Technishe Akademie Esslingen, Beitrag für 2. Kolloquium "Bauen in Boden und Fels", Januar 2002