

# QUELQUES ETUDES DE CAS DE SOLUTIONS GEOSYNTHETIQUE TRAITANT DE GLISSEMENTS DE TERRAIN ET DE PENTE INSTABLE

ARAB Rabah, BRUHIER Johann<sup>1</sup>, & ALEXIEW Dimitri, HANGEN Harmut<sup>2</sup>

*Johann.bruhier@huesker.fr*

<sup>1</sup>HUESKER France SAS, France

<sup>2</sup>HUESKER Synthetic GmbH, Allemagne

**Résumé :** Les solutions geosynthétiques utilisées dans les glissements de terrain et pentes instables sont de plus en plus fréquentes. Cet article illustre leur utilisation dans deux ouvrages importants :

- Dans le massif de Rhodope en Bulgarie où une vingtaine de murs en sol renforcé par des géogrilles avec une inclinaison du parement de 10V/1H et jusqu'à 20 m de haut ont été construits sur des versants instables en zone sismique.
- Dans la vallée de Trieben-Sunk en Autriche où des solutions mixtes murs de soutènement renforcé par des géogrilles et des tirants d'ancrage ont été utilisées.

**Mots-Clefs :** Murs renforcé par des géogrilles, parement, sismicité, instabilité de pente, pentes raides.

**Abstract :** The geosynthetic solutions used in landslides and unstable slope are more and more frequent. This article illustrates their use in two important works:

- In the massif of Rhodope in Bulgaria where twenty walls from geogrid-reinforced soil (GRS) with a face inclination of 10V / 1H and heights of up to 20 m without berms in seismic activity area.
- In the valley of Trieben-Sunk in Austria where mixed solutions between geogrid –reinforced walls and anchors have been chosen.

**Key-Words:** Geogrid-reinforced walls, facing, seismicity, slope instability, steep slopes.

## 1. Introduction

La construction sur des glissements de terrain et des pentes instables nécessite des innovations constantes tant en terme de concept que de mise en œuvre. Les deux chantiers présentés ci-dessous en sont une bonne illustration.

## 2. Projet : Le massif de Rhodope en Bulgarie

Dans le massif de Rhodope au sud de la Bulgarie, le tracé de la route III-868 entre Devin et Mihalkovo, partie intégrante du réseau routier national, a dû être radicalement modifié en raison de la construction d'un nouveau barrage sur le fleuve Vacha. L'ancienne route qui bordait le fleuve a dû être remontée de quelques centaines de mètres et elle traverse les collines au lieu de passer dans la vallée fluviale. Le nouveau tracé a une longueur de 11 km et est caractérisé par une topographie complexe (pentes très raides et irrégulières), des conditions géologiques et hydrologiques diverses, des tendances à l'instabilité dans certains endroits et l'impossibilité d'un accès aisé pour les travaux de construction. De plus, la région présente une activité sismique importante.

### 2.1. Principe et conceptions générales

Le projet a été élaboré par le consultant général bulgare "Energoprojekt - Hydropower" (groupe Sweco) et le bureau d'étude routier bulgare "Burda Engineering" avec la collaboration du département technique de HUESKER.

Il convient de mentionner d'abord quelques points particuliers :

1. Du fait des très fortes pentes naturelles (certaines étant supérieures à 1V:1H), le positionnement optimal et les fondations de tous les murs exigeaient une inclinaison frontale quasi verticale de 10V:1H pour s'adapter au mieux à la géométrie de la pente. La largeur à la base des ouvrages a dû

- être réduite au maximum afin de minimiser l'excavation ainsi que le déploiement le long de la pente.
2. Pour optimiser le mouvement des terres mais aussi en s'appuyant sur les pratiques courantes et une certaine prudence, trois types de profils en travers ont été envisagés : sans risbermes (normalement jusqu'à 6-8 m), avec une risberme (généralement jusqu'à 14 m) et avec deux risbermes (jusqu'à 22 m).
  3. La phase finale des analyses de la stabilité et de la conception des murs de soutènement renforcés par des géogrilles devait être achevée après le démarrage des travaux de construction (en raison de la logistique propre au site. La construction s'effectuait progressivement sur les tronçons de la route).
  4. Le parement constituait une question importante. Après avoir étudié différentes options, le système appelé "Muralex® Stone" a été retenu. Sa conception s'appuyait sur l'idée d'une "façade suspendue" ajoutée et reliée à la structure portante "réelle" des géogrilles à un stade de construction ultérieur (Figure 1).

Le système comportait de nombreux avantages :

- les géogrilles sont masquées et protégées des UV, des chocs, des incendies et des actes de vandalisme ;
- les déformations éventuelles des murs se produisent pendant la construction avant la mise en place du parement – la durée de vie de celui-ci démarre donc sans déformation ;
- le comportement ductile du parement sous des impacts sismiques et plus généralement lors de la déformation des murs quelle qu'elle soit pendant la phase post-construction, car il s'agit d'une structure souple, sans liaison rigide aux "véritables" murs de soutènement renforcés par des géogrilles (Figure 2) ;
- aucune fondation spéciale n'est nécessaire pour le parement ;
- une grande diversité de matériaux rocheux issus des travaux d'excavation sur le site pouvait être utilisée, etc.

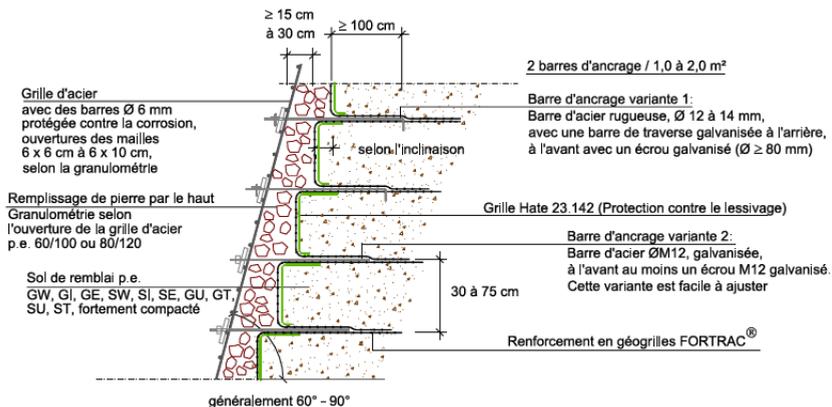


Figure 1. Une version type du système de parement Muralex

## 2.2. Conditions géologiques et hydrologiques

La géologie le long du nouveau tracé présente des caractéristiques très variables. Les murs de soutènement renforcés par des géogrilles et leurs fondations peuvent être respectivement en contact sur leur face arrière et noyés dans un sol en place composé soit d'argiles limoneuses ou sableuses charpentées, soit de rocher plus ou moins monolithique. Le matériau de remblai, issu de ces déblai, malgré une présélection, restait très hétérogène d'un ouvrage à l'autre.

## 2.3. Quelques questions sur l'analyse de la stabilité

Toutes les analyses de stabilité ont été conduites dans le département technique de HUESKER et ont reposé sur la méthode reconnue des cercles de Bishop ainsi qu'à des analyses supplémentaires des lignes de rupture polygonale, basées sur la méthode dite de "glissement des blocs". Les dimensionnements ont été effectués

avant l'apparition des Eurocodes, ceux-ci ont été effectués en considérant un facteur de sécurité global pour la stabilité interne et mixte.

Les géogrilles retenues comme renfort sont de la famille "FORTRAC®" en raison de leur résistance spécifique élevée à court et à long terme, des faibles contraintes qu'elles présentent à court et à long terme, de leur faible fluage, de leur fort coefficient d'interaction avec une grande diversité de sols et de leur souplesse, résultant en une mise en place facile.

Dans des conditions normales (statiques), le facteur de sécurité (FOS) requis a été choisi conformément aux normes bulgares et vaut  $FOS > 1,3$ .

Dans les conditions sismiques, qui sont particulièrement importantes puisque la région présente une forte activité sismique avec un risque de séisme de magnitude VII sur l'échelle de Richter (figure 3), le facteur de sécurité (FOS) requis vaut 1,1 tout en minimisant l'angle de frottement des sols et en considérant le massif renforcé comme un ouvrage en terre (non rigide et non cassant).

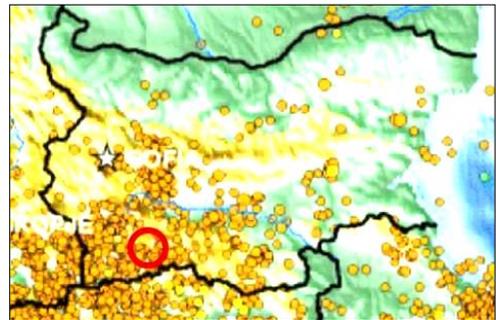
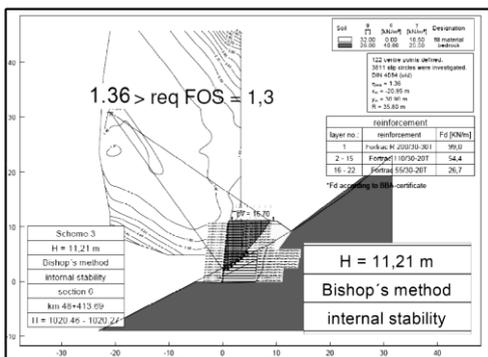


Figure 2. Exemples d'analyses de la stabilité interne d'après Bishop

Figure 3. Activités sismiques en Bulgarie, avec localisation du projet.

#### 2.4. Exécution, problèmes, solutions, expérience

L'exécution des travaux a démarré à l'été 2007. Les premiers problèmes sont très vite apparus : la topographie s'écartait parfois significativement des prévisions, le terrain réel était quelquefois plus élevé ou plus bas que prévu, l'inclinaison réelle de la pente souvent plus forte. Petit à petit, de nombreuses coupes en travers ont dû être redessinées. Au bout du compte, tous les murs de soutènement renforcés par des géogrilles, même le plus haut qui dépassait 20 m, sont devenus "sans riserme", ce qui est tout à fait exceptionnel (figures 4 et 5). La solution "sans riserme" offre des avantages significatifs : la largeur à la base des ouvrages devient réduite au maximum. Cette faible largeur a permis d'éviter d'une part, de procéder à de profondes tailles dans les versants et/ou d'autre part, de déployer le trapèze au-delà de la ligne de pente raide.



Figure 4. A gauche: phases de la construction (coffrage, géogrilles, barres d'ancrage, parement). A droite : vue de dessus du parement rempli de pierre



Figure 5. Vue de dessus d'un mur de soutènement renforcé par des géogrilles achevé

## 2.5. Conclusions

La nouvelle route III-868 entre Devin et Mihalkovo dans le massif de Rhodope au sud de la Bulgarie a représenté un défi en termes de conception, d'étude, d'exécution, de ré-étude en cours d'exécution, de calendrier et de coûts. Cette route traverse un terrain à la topographie et à la géologie complexes dans une région sismique. La route est longue de 11 km et les travaux comprennent un tunnel et vingt murs de soutènement renforcés par des géogrilles quasiment verticaux d'une longueur totale de 2 km et d'une hauteur allant jusqu'à plus de 20 m. Le parement spécial adopté visait à satisfaire à un large éventail d'impératifs.

Presque tous les murs de soutènement renforcés par des géogrilles ont dû être redessinés et adaptés pendant l'exécution des travaux routiers, ce qui s'est finalement soldé par l'adoption de solutions de grande hauteur et sans riserme peu courantes.

Néanmoins, il a été possible de satisfaire à tous les objectifs du projet en ce qui concernait le calendrier et les coûts. La réussite est le résultat d'une part, des avantages et de la souplesse qu'apportent les solutions géosynthétiques en géotechnique et d'autre part, de l'excellent esprit de collaboration qui a animé tous les participants: l'investisseur, les consultants, les entrepreneurs et le producteur de géosynthétiques.

La route est en service depuis l'été 2010, les murs de soutènement renforcés par des géogrilles ont témoigné jusqu'à présent d'un excellent comportement à la fois en termes de stabilité et de faible déformation.

Ce projet de transport est probablement le projet le plus remarquable conduit dans la région au cours des dernières années

## 3. Projet de Trieben-Sunk, Autriche

La route B114 est située en Styrie (Autriche). Elle passe au-dessus de Hohentauern et relie sur une distance de 48 km environ les villes de Trieben dans la vallée de Paltental et Judenburg dans la vallée de Murtal. Avec un volume de trafic prévisionnel de 2 000 véhicules par jour, pour un pourcentage de véhicules lourds de 9 % (Lackner 2008), la route B114 constitue un axe nord-sud important. Contrairement à la section sud, la section nord présentait, malgré une première série de travaux dans les années 80, une déclivité importante de 13%. Pour des notions de fluidité et de sécurité, un réaménagement était nécessaire.

### 3.1. Problématique géotechnique

Les dégradations sur le tronçon existant, des ouvrages de soutènement, des ponts à flanc de coteau et de la superstructure routière provoquées par la reptation du versant nécessitaient jusqu'alors des travaux importants et continus. En dépit de ces mesures, l'état du tronçon s'était sensiblement détérioré : le revêtement de la chaussée et les murs de soutènement latéraux présentaient des fissures visibles qui ont même entraîné par endroits l'éclatement du parement ou la destruction de tirants d'ancrage / de têtes de tirant. Outre ces problèmes localisés, il existait un risque réel de glissement de terrain à grande échelle.

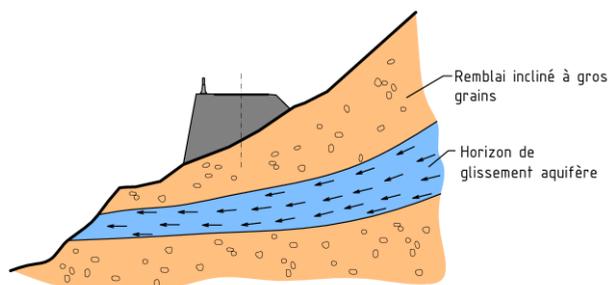


Figure 6 : représentation schématique de la zone de perturbations géologiques

En raison de l'ampleur des dégradations déjà survenues et à prévoir, une simple réfection du tronçon existant a été jugée inacceptable d'un point de vue technique et économique. Il a donc été décidé de construire un nouveau tracé.

### 3.2. Tracé

Les conditions géologiques et topographiques extrêmement délicates ont donc conduit à un transfert du tracé du côté opposé de la vallée, plus ou moins parallèlement à l'ancien tracé. La longueur totale du nouveau tronçon est de 2,9 km environ avec une dénivelée de 221 m.

### 3.3. Stabilisation du versant et ouvrage de soutènement

En raison du caractère impraticable du terrain, avec des versants extrêmement abrupts par endroits et des zones de fractures sur ce côté de la vallée, il n'était pas possible d'avoir recours aux méthodes conventionnelles de stabilisation en béton armé, en palplanches ou en mur poids.

Après avoir étudié en détail les différents paramètres, le choix s'est porté sur une solution combinée avec des ouvrages en terre armée renforcés par des géogrilles et des tirants d'ancrage. L'avantage de cette solution, mise au point par le bureau d'études Lackner de Graz, réside dans la grande ductilité et flexibilité géométrique du système. Les tassements absolus et différentiels peuvent être absorbés quasiment sans dégradations et ils ne compromettent pas la stabilité et la praticabilité de l'ouvrage.

Les murs de soutènement renforcés par géosynthétiques présentent pour la plupart une inclinaison frontale de 70° et peuvent atteindre 28 m de haut.

### 3.4. Calculs de stabilité

Le nouveau tracé avait comme postulat que le corps de la chaussée devait reposer sur un ouvrage en terre le plus homogène possible. Une fois la géométrie extérieure du remblaiement déterminée, le profil d'excavation a été adapté.

Pour cela, on s'est livré dans un premier temps à des calculs de stabilité statique externe. Comme pour un mur de soutènement classique construit dans une zone de glissement de terrain, seuls ont été pris en considération les plans de glissement situés à l'extérieur de l'ouvrage en terre armée. Cela a permis de déterminer et de vérifier le profil d'excavation nécessaire ou imposé par la géométrie du lieu. Une fois ce travail accompli, on a pu déterminer la disposition définitive des armatures et les exigences à respecter pour les renforts géosynthétiques utilisés.

De nouvelles études analytiques itératives ont été menées pour cela en se basant là encore sur des surfaces de glissement circulaires et polygonales situées soit exclusivement à l'intérieur de l'ouvrage en terre, soit à l'intérieur et à l'extérieur. L'écart et la longueur des renforts et la résistance nominale des géosynthétiques utilisés ont été variés jusqu'à obtenir la solution optimale.

### 3.5. Mise en œuvre et travaux

La configuration topographique et géologique des lieux a constitué un défi de taille pour la société Alpine Bau GmbH de Salzbourg qui était chargée des travaux.

La zone du chantier était située pour une grande part sur un terrain extrêmement pentu. Les voies de chantier aménagées étaient de largeur minimale, avec des déclivités importantes et des virages serrés (figure 7), ce qui nécessitait d'optimiser le moindre transport (matériaux de remblai et matériel). Le recours aux géogrilles Fortrac® s'est révélé ici un atout précieux. Les géogrilles ont été découpées, pliées et mises en palettes sur un site central conformément aux plans de pose détaillés. Elles ont ainsi pu être ensuite transportées aisément jusqu'au lieu d'intervention en dépit de l'étroitesse des voies de chantier.



Figure 7 : voies de chantier

Avant de commencer à construire les murs de soutènement en terre renforcés par des géosynthétiques, il a fallu dégager en partie les débris des versants. Cela s'est fait par niveaux d'excavation de 2,0 m sécurisés par une structure renforcée en béton projeté de 15 cm d'épaisseur et par des tirants d'ancrage forés et injectés.

Dans certaines zones critiques, il a fallu avoir recours à des barres verticales en béton nervuré de 1,0 m de profondeur et 2,50 m de large espacées de 4,0 m pour obtenir une fondation d'une portance et d'une stabilité suffisantes pour les murs de soutènement renforcés (figure 8). Des semelles de recouvrement en béton armé ont été en outre fixées sur les barres en béton et sécurisées durablement par une nappe d'ancrage arrière à l'aide de tirants GEWI.

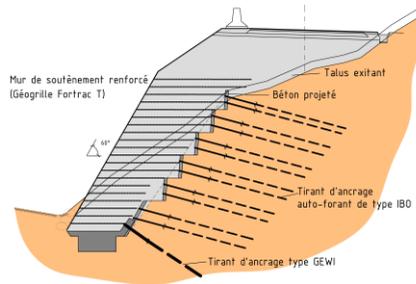


Figure 8 : schéma de principe d'une coupe transversale type

### 3.6. Parement

Comme coffrage perdu et support de végétalisation, on a utilisé pour le parement des treillis de construction métalliques spécifiques. Ces treillis ne possèdent pas de revêtement spécial et ne sont pas protégés contre la corrosion ; ils ne peuvent par conséquent être considérés comme des composants efficaces à long terme d'un point de vue statique. Afin que la construction absorbe durablement la pression exercée par la terre sur l'enveloppe extérieure du talus, on a donc intégré des géogrids posés avec un rabat. Une grille de protection contre le lessivage a été de plus incorporée à l'ensemble en guise de protection contre l'érosion des particules fines et de couche d'adhérence pour l'hydro-ensemencement (figure 9). La végétalisation par hydro-ensemencement a eu lieu dès l'achèvement des talus.

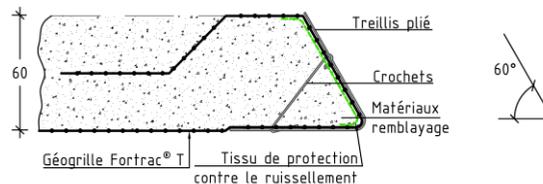


Figure 9 : schéma de principe du parement avec rabat et végétalisation

L'expérience montre que cette manière de faire est à la fois sûre à long terme, pratique et peu onéreuse.

### 3.7. Mesures de suivi

Afin d'observer les déformations des différents ouvrages et de l'ensemble du versant et de vérifier l'efficacité des mesures de sécurisation, de nombreux capteurs géotechniques ont été installés dès la phase du chantier. Outre un dispositif de points de mesure géodésiques à maillage fin, on a en particulier eu recours ici à des inclinomètres et à des capteurs destinés à surveiller les forces d'ancrage. L'exploitation des premières données de mesure a montré que le versant continue à se déformer, comme c'était prévisible, mais que ces déformations ont été considérablement réduites. À l'heure actuelle, c'est-à-dire trois ans plus tard, aucun changement n'a été constaté sur ce point.

### 3.8. Résumé

Le projet présenté illustre l'efficacité des constructions renforcées par des géosynthétiques sur un plan technique, économique et écologique.

Le comportement ductile des armatures en géosynthétiques adaptées aux spécificités locales et la flexibilité d'aménagement du parement font de ces constructions une solution optimale, même en cas de reptation de versants. Outre les propriétés mécaniques positives des ouvrages en terre armée, cette méthode assure une intégration optimale de l'ouvrage dans le paysage. La grande flexibilité des géogrilles utilisées a permis un transport aisé et peu encombrant du matériel sur le chantier, ce qui constituait dans ce cas précis un avantage précieux (figure 10 et 11).



Figure 10 : vue partielle de talus en terre armée dans la zone des virages en épingle en vue de l'autorisation du trafic, été 2008



Figure 11 : vue partielle de talus en terre armée dans la zone des virages en épingle, été 2011

#### 4. Conclusion

Outre le fait que ces 2 projets ont donné une entière satisfaction aux maîtres d'ouvrages et aux maîtres d'œuvres sur le plan technique, économique et intégration optimale dans le paysage, on retiendra particulièrement leur grande souplesse d'utilisation. Ce type d'ouvrage où les impondérables se découvrent au fur et mesure des travaux, nécessite en effet une très grande flexibilité et adaptabilité des solutions.

Que ce soit pour le projet du massif de Rhodope ou pour la vallée de Trieben-Sunk, nous tenons à remercier l'esprit d'équipe et constructif de nos partenaires sans lesquels ces histoires n'auraient pu avoir lieu.

#### 5. Bibliographie

- [1] Christiaan Lackner : “*Numerische Simulation von kunststoff bewehrten Dämmen*“, Diplomarbeit , Institut für Bodenmechanik und grundbau technische Universität Graz, Januar 2008
- [2] D. Alexiew & H. hangen: “ *Design and construction of high bermless geogrid walls in a problematic mountainous seismic region in Bulgeria*” Compte-rendu du 18 ième Congrès international de Mécanique des sols et de Géotechnique, Paris, 2013, pp.
- [3] D. Alexiew & Co. : “*Twenty eight meters high geogrid reinforced embankments as flexiblesolutions in problematic hillsides: Project Trieben-Sunk, Austria*” 9th International Conference on Geosynthetics, Brazil, 2010, pp