

LES GEOSYNTHETIQUES AU SERVICE DE L'AMELIORATION DES SOLS ET DE LA PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT

ARAB Rabah¹ & BRUHIER Johann¹ & ZERHOUNI Moulay² & DURAND Romain¹

rabah.arab@HUESKER.fr

¹HUESKER France SAS

²ARCADIS France

Résumé : Les géosynthétiques ont connu un essor considérable et leur développement ne cesse de s'accroître par la mise au point de nouveaux polymères et de nouveaux produits pour répondre à des problématiques bien spécifiques et ce dans les domaines de la géotechnique, du génie civil et de la protection de l'environnement. Nous nous proposons de montrer à travers des chantiers, les procédés d'amélioration des sols (renforcement et/ou drainage) et de la protection de l'environnement à l'aide des géosynthétiques où, dans certains cas, les techniques conventionnelles ne peuvent pas être appliquées. Pour chaque chantier, il sera mis en évidence, l'apport du procédé dans la préservation de la ressource naturelle et la protection de l'environnement.

Mots-Clefs : géosynthétique, géogrid, sols, amélioration, environnement.

Abstract : Geosynthetics knew considerable development. This one is continually in move due to the development of new polymers and new products to answer very specific problems in the areas of geotechnics, civil engineering and, environmental protection. This paper shows some cases through work sites, where processes of ground improvement (reinforcement and/or drainage) and of environmental protection, use some geosynthetics. For some of these works, the conventional techniques could not be applied. For every construction site, it will be shown the contribution of the process in the conservation of the natural resource and the environmental protection

Key-Words: Geosynthetic, Geogrid, Soils, Improvement, Environment.

1. Introduction

Le succès des procédés géosynthétiques n'est plus à démontrer. Ce sont des produits présents dans tous les domaines de la construction (bâtiment, travaux publics, génie hydraulique, travaux maritimes, environnement, agriculture, etc.). Ce succès se justifie par l'innovation apportée dans la conception des ouvrages, la rigueur des procédés de fabrication industrielle, le développement simultané de méthodes d'essais standardisées permettant de caractériser et de contrôler les produits et d'autre part par des méthodes de dimensionnement s'appuyant sur l'observation d'ouvrages-pilotes en vraie grandeur. Dans la suite, nous présenterons quelques ouvrages pour illustrer ces affirmations.

2. Remblai sur sols compressibles – expérimentation à long terme

La construction de remblai de pré-chargement, renforcé à la base par des armatures géosynthétiques de haute résistance s'est imposée dans plusieurs pays, notamment en Allemagne comme technique de construction dans les projets d'infrastructures linéaires. En effet, de nombreux projets expérimentaux ont été réalisés et ce depuis les années soixante-dix. Les objectifs des programmes et des études étaient multiples : analyser la consolidation et la déformation du sol support de faible portance, le comportement des ouvrages longtemps après leur mise en service, le comportement à court et long terme des géosynthétiques et utiliser les connaissances et l'expérience acquises pour la construction de routes [4] [5] [6] [7]. Dans ce qui suit seront présentés deux remblais expérimentaux : « le remblai expérimental de Rübke construit en 1981 » et le « remblai expérimental de Großenmeer construit en 1986 ». Les caractéristiques des deux remblais sont illustrées respectivement sur les figures 1 et 2.

Les mesures effectuées sur le remblai de Rübke concernent les tassements, la pression interstitielle, les contraintes à la base, les déformations latérales et le niveau de la nappe souterraine pour évaluer la déformation et les tensions dans le géosynthétique.

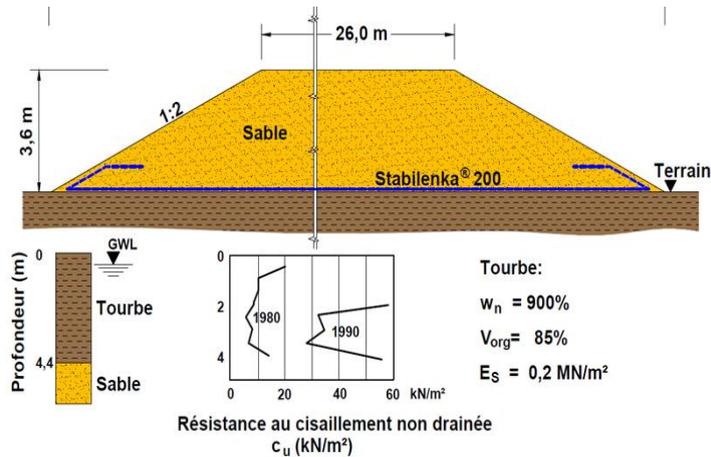


Figure 1. Remblai expérimental de Rübke : vue d'ensemble

"Remblai expérimental" ("crash test")

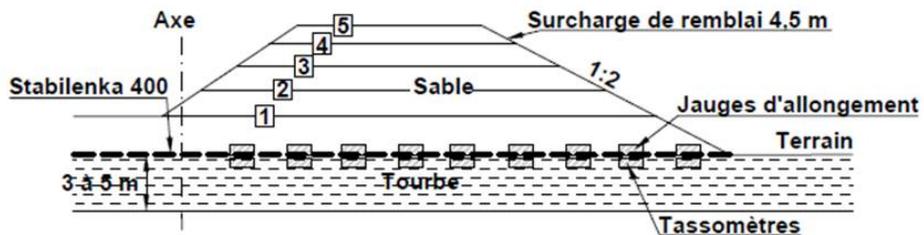


Figure 2. Tronçon test « TA » de Großenmeer : remblaiement (5 couches en 4 jours)

La courbe de l'évolution des surpressions interstitielles montre que ces dernières se dissipent rapidement, quelques jours seulement après l'arrêt de la construction du remblai. Après une pause de deux mois avec une hauteur de remblai $h_s = 2,3$ m, les mesures des pressions interstitielles indiquent un degré de consolidation $U_z \geq 80\%$. Si l'on se base sur les résultats des mesures des pressions interstitielles et du tassement, la transition entre les tassements primaires et secondaires de la tourbe avec un degré de consolidation $U_z \sim 90\%$ est intervenue déjà au bout de 5,5 mois. Le tassement total au bout de 2 ans sous une hauteur de remblai $h_s = 2,3$ m était de 1,7 m. Il a été constaté également une diminution substantielle de la vitesse de tassement (figure 3). Dès 1998, la vitesse était inférieure à 0,5 cm/an. L'évolution des tassements étant négligeable, les mesures ont été arrêtées en 2004. L'allongement moyen de l'armature déduit du profil des tassements est de l'ordre de 3 à 4 % environ.

Les déformations horizontales mesurées à l'aplomb du pied du remblai étaient de 18 cm dans la couche de tourbe et de 12 cm à la surface du terrain. La résistance au cisaillement non drainée c_u de la tourbe située sous le remblai, qui avant le début des travaux était de 8 kN/m^2 en moyenne (mesures effectuées au scissomètre) a triplé après trois mois de consolidation sous la hauteur du remblai $h_s = 2,3$ m et a quadruplé au bout de quatre mois sous la hauteur finale du remblai $h_s = 3,6$ m. Les essais effectués au scissomètre en 1990 ont montré une nouvelle amélioration de la cohésion non drainée c_u dans des proportions négligeables.

Les résultats et l'expérience acquis lors de la construction du remblai de Rübke ont servi lors de la construction de la route nationale B 211 près de Großenmeer. En effet, lors de ce projet l'Institut fédéral des recherches routières (BAST) a recommandé aux autorités l'utilisation de géosynthétique. Pour cela, elle a lancé un essai à grande échelle incluant des mesures d'allongement dans le but d'observer le comportement du géotextile à haute résistance en réalisant deux tronçons de remblais expérimentaux, un remblai test « TA » et un remblai de référence « RA ».

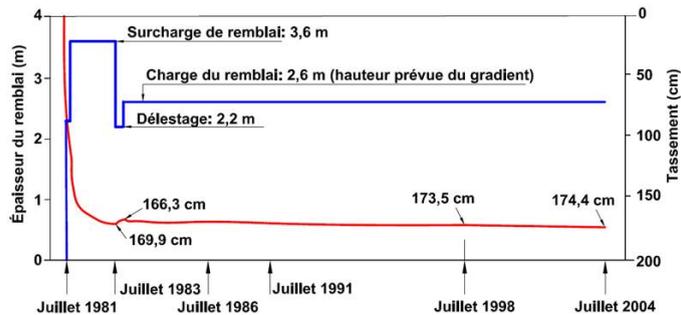


Figure 3. Remblai expérimental de Rübke » : courbe de la charge et du tassement sur 23 ans, de juillet 1981 à juillet 2004

Le remblai routier de Großenmeer fait 2 km de long. Le sol support mou est composé de couches de tourbe et de limons fortement organiques de 3 à 5 m d'épaisseur sous lesquelles on trouve un substratum constitué de sable. D'un point de vue géotechnique, les conditions étaient comparables à celles du « remblai expérimental de Rübke ».

Le remblai test « TA » de 4,5 m de hauteur a été réalisé en 4 jours seulement pour simuler un chargement dynamique. L'objectif était de provoquer une sollicitation importante de la nappe géotextile à la base du remblai. La pente adoptée pour les talus était de 1V/2H. Le remblai de référence « RA » a été édifié sur 12 mois avec une pente des talus 1V/3H en tenant compte des résultats des mesures géotechniques.

Les deux remblais « TA » et « RA » devant être tous deux ultérieurement intégrés à l'ouvrage fini, il était important d'éviter tout risque de rupture, particulièrement pour le remblai « TA » et ce malgré une édification rapide. Les deux remblais ont fait l'objet de mesures de surveillance pour contrôler le tassement, la pression interstitielle, les déplacements latéraux et le niveau de la nappe phréatique. Pour la première fois, il a été possible de mesurer directement l'allongement de la nappe géosynthétique. Au total, 27 capteurs de mesure d'allongement mis au point par le BAST ont été installés sur trois lés des remblais « TA » et « RA ».

Les analyses de stabilité effectuées selon la norme DIN 4084 (méthode de Bishop) [5] [6] [4] [1] sur le remblai « TA » ont montré que sans renforcement, la rupture surviendrait dès que la hauteur atteint 2,6 m. Pour atteindre la hauteur finale de 4,5 m avec un coefficient de sécurité $F \geq 1,2$ (en phase travaux), il était nécessaire que la force de traction effective dans le géosynthétique soit de 200 kN/m. Après une étude à long terme (isochrones), le choix s'est porté sur un géotextile en polyester d'une résistance de 400 kN/m et un allongement à l'effort maxi $< 10\%$ (EN ISO 10319). La route nationale a été ouverte au trafic en octobre 1990 (y compris les remblais « TA » et « RA »). Une première rénovation de la chaussée a eu lieu 18 ans plus tard durant l'été 2008.

2.1 Résultats des mesures et interprétation

Les principaux résultats obtenus sur le remblai « TA » sont illustrés sur la figure 4. Dès le début des travaux, le géotextile est sollicité. Sous une hauteur de remblai de 1,5m, les allongements mesurés dans le géotextile sont de 3% environ et les tassements à mi pente du talus ont atteint 32 cm. A cet endroit, une zone de plus faible portance du sol support est décelée. Ce qui s'est traduit par des allongements importants localement et une forte sollicitation du géotextile. Le déplacement horizontal latéral du sol support au pied du talus de remblai était de 40 cm. Comme la capacité portante de la couche de tourbe est très réduite, l'ouvrage a vite atteint le seuil de rupture. Cet état limite s'est manifesté par l'apparition d'une rupture par refoulement dans le sol support, ayant pour effet d'écraser latéralement la tourbe. Certaines mesures d'allongements du

géotextile dépassaient localement les valeurs prises en compte par le dimensionnement, soit 5 % (court terme) et 6 % (long terme). Le coefficient de charge (force de traction mobilisée/résistance à la traction court terme) était largement supérieur à 50 % références Stabilenka®, [11] et avoisinait une plage non prévue. Il est nécessaire et recommandé d'adopter des hypothèses et des solutions plus conservatrices pour tenir compte de tels «aléas», car même un sol support mou soigneusement étudié et considéré comme homogène en phase projet peut manifestement présenter localement des « zones de faiblesse » à risques en phase travaux.

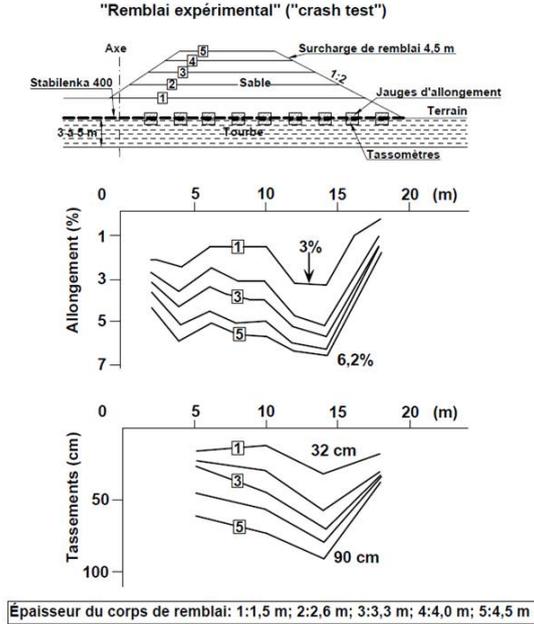


Figure 4. Tronçon test « TA » de Großenmeer : remblaiement (5 couches en 4 jours), tassements et allongements mesurés

La figure 5 présente les résultats des mesures à long terme sur le remblai « RA ». Les tassements maximaux mesurés étaient de 205 cm environ lors de l'enlèvement de la surcharge.

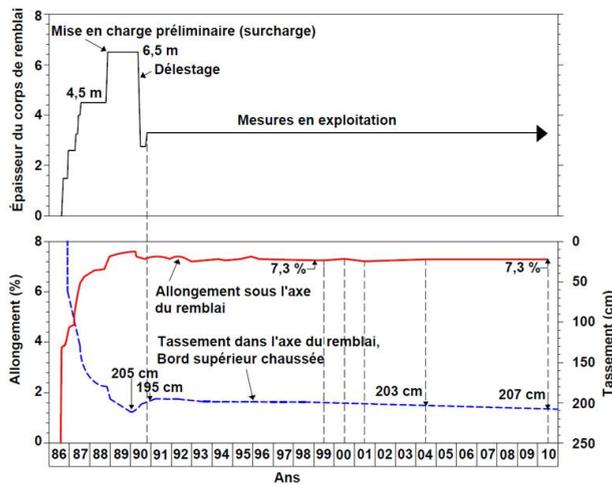


Figure 5. Tronçon de référence (« RA ») de Großenmeer : charge, tassement et allongement de l'armature sur 24 ans (1986-2010)

Le déblaiement a entraîné un rehaussement de 10 cm environ. Après la pose de la structure de chaussée définitive et vingt années de trafic, le tassement s'est accru au total de 12 cm environ. De plus amples informations sur le tronçon « RA » se trouvent dans les publications [4] [6]. Les mesures ont eu lieu sur une base annuelle jusqu'en 2001, puis elles ont été répétées en 2004, 2009 et 2010. Au total, elles s'étendent sur plus de 24 ans jusqu'à aujourd'hui. Les allongements mesurés dans le géotextile (7,3 % environ) restent quasiment constants de l'ouverture au trafic en 1990 jusqu'en 2010. Ces résultats indiquent clairement que l'armature géotextile est encore sous tension 24 ans après sa mise en œuvre.

Si l'on se base sur le comportement traction-allongement à court et long terme (isochrones) du géotextile utilisé (Stabilenka® 400), le coefficient de charge a atteint 70 % durant une phase de pic, puis il est revenu à 60 % environ jusqu'à aujourd'hui. Ces coefficients de charge sont particulièrement élevés. Il est difficile de livrer une évaluation exacte de ces résultats. La relaxation et d'autres phénomènes peuvent avoir influé sur l'état de l'armature géotextile et réduit la force de traction effective.

Les mesures effectuées sur le géotextile montrent que les allongements induits par les déformations sont conservés à long terme conformément aux conditions de mise en charge dans le système remblai/géotextile/sol support. Mais il n'est pas possible d'en tirer des conclusions sur la force de traction résiduelle dans le géotextile si on ne connaît pas son état de conservation. L'analyse des échantillons de géotextile prélevés sur le « remblai expérimental de Rübke » contribue à estimer l'ampleur de ces modifications. On suppose pour cela que les résultats de Großenmeer et du « remblai expérimental de Rübke » sont comparables.

2.2 Comportement du géotextile à long terme dans le remblai expérimental de Rübke

2.1.1 Description des fouilles et tests

En septembre 1995, soit 14 ans après la pose, des échantillons (plus de 100 m²) de géotextile Stabilenka® 200 ont été prélevés sous le remblai expérimental de Rübke avec le soutien financier du fabricant. Le géotextile était situé en dessous de la nappe souterraine en raison des tassements importants sous la surface du terrain et il était sous tension. Cette observation concorde avec les résultats des mesures d'allongement réalisées sous le remblai « RA » de Großenmeer. Des examens mécaniques et chimiques poussés ont été effectués sur les échantillons de géotextiles et en particulier sur les fils (filaments) en 1995. De nombreux facteurs ont été étudiés à cette occasion (fabrication, pose, fouille, analyse). Les examens ont été poursuivis de manière encore plus détaillée par l'Institut fédéral pour la recherche et les essais des matériaux (BAM – *Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung*) jusqu'en 2004 [3].

En 2009, soit 28 ans après l'achèvement des travaux, d'autres échantillons (60 m²) ont été prélevés selon le même protocole qu'en 1995. Les examens mécaniques et chimiques effectués sur les échantillons étaient également les mêmes qu'en 1995 [1].

2.1.2 Résultats et interprétation

En 1995, les examens mécaniques effectués sur le géotextile, en particulier sur des filaments (critère le mieux adapté à une comparaison avec les données de 1981, [1]), ont donné, à l'issue du traitement statistique des données, les courbes allongement-force de traction représentées sur la figure 5. Pour évaluer et analyser les résultats des tests mécaniques, il a été pris en compte un certains nombres de paramètres susceptibles de restreindre la résistance des filaments, notamment les endommagements lors de la pose, les détériorations lors de l'extraction. L'étude a mis en évidence une perte de résistance sous tension de 1,5 % en 14 ans dans des sols saturés, soit un peu moins de 1 % sur 10 ans. Les résultats permettent de conclure à une grande résistance au vieillissement du géotextile par rapport aux facteurs environnants. Les examens chimiques (poids moléculaire, etc.) n'ont révélé que des variations mineures par rapport à l'état initial. Les examens très détaillés effectués à l'Institut fédéral pour la recherche et les essais des matériaux [3] ont débouché sur de meilleurs résultats et laissent à penser que la perte de résistance sur 14 ans est inférieure à 1 % au lieu des 1,5 % trouvés préalablement.

En 2009, les examens mécaniques effectués étaient totalement similaires à ceux de 1995. Les tests réalisés étaient au nombre de 45. Le comportement traction - allongement du matériau est illustré sur la figure 6. Le constat le plus important comparativement aux résultats de 1995 est qu'aucune diminution de la résistance à la traction et, de manière générale, aucune modification du comportement mécanique n'a été constatée durant les 14 années suivantes jusqu'en 2009. La perte de résistance enregistrée entre 1995 et 2009 est donc

quasiment nulle. Comme en 1995, des tests chimiques ont été également effectués et les écarts inhérents aux essais (écarts de dispersion) semblent être plus importants que de possibles modifications liées au vieillissement.

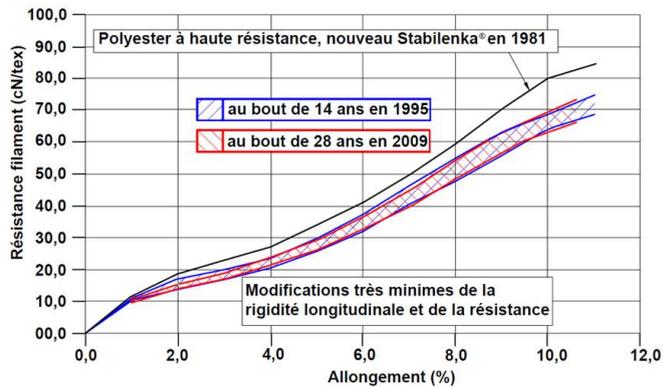


Figure 6. Remblai expérimental de Rübke, résistance des filaments au bout de 14 et 28 ans sous tension dans un sol saturé en eau

2.3 Conclusion et observations finales

Les expérimentations menées ont fait l'objet de mesures et d'observations à long terme. Les informations acquises lors de l'expérimentation du remblai de Rübke ont permis de montrer le bon comportement à long terme de l'armature géotextile (28 années), tandis que le projet Großenmeer a permis de mesurer directement l'allongement dans le géotextile sur 24 années. Au bout de 24 et 28 ans, les principales observations qui peuvent être énoncées dans le cadre des deux projets sont les suivantes :

- les calculs de stabilité selon la norme DIN 4084 (Bishop) sont suffisamment précis même pour des déformations importantes en cas de force de traction élevée et d'allongements de courte et longue durée réduits ;
- des surprises sont toujours possibles au niveau du sol support et elles peuvent entraîner par endroits des surcharges de l'armature c'est pourquoi il convient d'adopter des hypothèses conservatrices ;
- les tassements ultérieurs constatés à long terme dans le cadre de l'exploitation ne sont pas critiques d'un point de vue technique ;
- l'armature géosynthétique est encore sous tension au bout de 24 ans et continue à remplir sa « fonction » bien que la consolidation soit pratiquement achevée. C'est pour cela qu'il convient de tenir compte des caractéristiques à long terme des géosynthétiques ;
- la réduction de la résistance et des modules de traction du géotextile suite au « vieillissement » (influence de l'environnement) est comprise entre 0 % et 5 % pour une période de 100 ans sur la base des expériences recueillies au bout de 28 ans, ce qui dénote une très grande endurance.

Le procédé de renforcement des remblais de pré-chargement à la base à l'aide de géosynthétique peut être considéré comme conforme à l'état de la technique à tous égards et elle contribue de manière substantielle à la sauvegarde de l'environnement. En effet, le mouvement des terres est réduit et le seul apport de matériaux et celui qui a servi à la construction du remblai.

3. Stabilisation des pentes par massifs renforcés par des géogrilles

Les routes de montagne sont sujettes à des désordres et à des ruptures de par la géomorphologie favorable aux phénomènes de glissement des sites qu'elles traversent. Ce type d'instabilité concerne de nombreuses routes de montagne en Algérie, plus particulièrement dans l'est du pays (figure 7).



Figure 7. Talus et versant instables en montagne

La technique de renforcement par géosynthétiques s'est développée au milieu des années 70. Le premier massif de soutènement a été réalisé en 1977 dans les Alpes françaises à Prapoutel les Sept Laux (figure 8). Il s'agissait d'un ouvrage définitif dont le parement devait être recouvert de bois et 33 ans après, l'ouvrage est toujours là et le parement définitif en bois n'a jamais été mis en place.



Figure 8. Mur construit en 1977 à Prapoutel les Sept Laux (+1350 m) Alpes (Nappes de Stabilenka® 200

Cette technique contribue de manière efficace seule ou en combinaison avec d'autres techniques dans le traitement de glissement de terrain et le confortement des talus (naturels ou anthropiques).

3.1. Dimensionnement des ouvrages de soutènement

Le dimensionnement de tels ouvrages est basé sur les méthodes d'équilibres limites (Bishop, Fellenius, etc). En France, il est fait référence à La norme NF P94-270 (juillet 2009), élaborée pour compléter l'Eurocode 7 (NF EN 1997-1), dont elle constitue la norme nationale d'application pour ce type d'ouvrage. Le document est conforme aux principes du calcul aux états limites avec facteurs partiels, définis dans la norme NF EN 1990 et son Annexe nationale NF P06-100-2, et respecte les exigences de la norme NF EN 1997-1 et de son Annexe nationale NF P94 251-2, applicable au calcul des ouvrages géotechniques. Il existe également la norme XP G38-064 (aout 2010), rédigée par un groupe d'experts de la commission géosynthétique du Bureau National Sols et Routes (BNSR). Elle a pour objet la justification par le calcul des talus renforcés par des nappes géosynthétiques. Sont considérés comme talus, les ouvrages dont l'inclinaison du parement est inférieure ou égale à 1H/4V au sens de la norme NF EN 14475. Pour les ouvrages dont l'inclinaison est supérieure à 1H/4V, la norme NF P94-270 s'applique. Ce second document est une norme expérimentale. Les deux normes (NF P94-270 et XP G38-064) ne s'appliquent pleinement qu'aux projets relevant de la catégorie géotechnique 2, en d'autres termes aux ouvrages courants qui ne présentent pas de risque exceptionnel et ne sont pas exposés à des conditions de terrain ou de chargement difficiles. La norme XP G38-064 permet un

choix de matériaux de remblai plus large en fonction de la finalité de l'ouvrage. En plus de tenir compte de l'Eurocode 7 (NF EN 1997-1), les deux normes prennent en considération les nombreuses recherches concernant la durabilité des géosynthétiques et résumées dans les deux guides : ISO/TS 13434 :2008 Géosynthétiques Lignes directrices concernant la durabilité et ISO/TR 20432 :2007 : lignes directrices pour la détermination de la résistance à long terme des géosynthétiques pour le renforcement des sols.

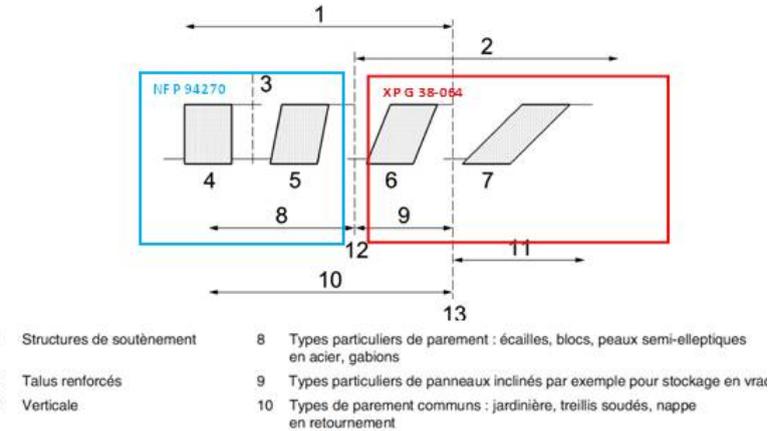


Figure 9. Types de Structure de soutènement et de parement en fonction de la face extérieure (conformément à la norme NF EN 14475)

3.2. Exemple de stabilisation d'un versant à l'aide de massif renforcé par géogridde

Il s'agit de la réhabilitation d'un tronçon de route de montagne, long de 2,9 km dans les Alpes autrichiennes. La définition d'un nouveau tracé ne s'est pas faite aisément en raison des conditions géologiques et topographiques difficiles. Le recours aux méthodes conventionnelles de stabilisation (béton armé, palplanches ou murs poids) n'était pas possible à cause des difficultés du site et de l'existence de versants très abrupts par endroits et de zones de fractures. Après études et analyses approfondies des différents paramètres, le choix s'est porté sur une combinaison de deux techniques : ouvrages en sol renforcés par des géogrilles et des tirants d'ancrage. L'avantage de cette solution réside dans la flexibilité géométrique du système. Les déplacements absolus et différentiels peuvent être absorbés quasiment sans désordres et sans compromettre la stabilité et la praticabilité de l'ouvrage. Les murs de soutènement renforcés par géogrilles présentent pour la plupart une inclinaison du parement de 70° et la hauteur avoisine 28 m par endroit.

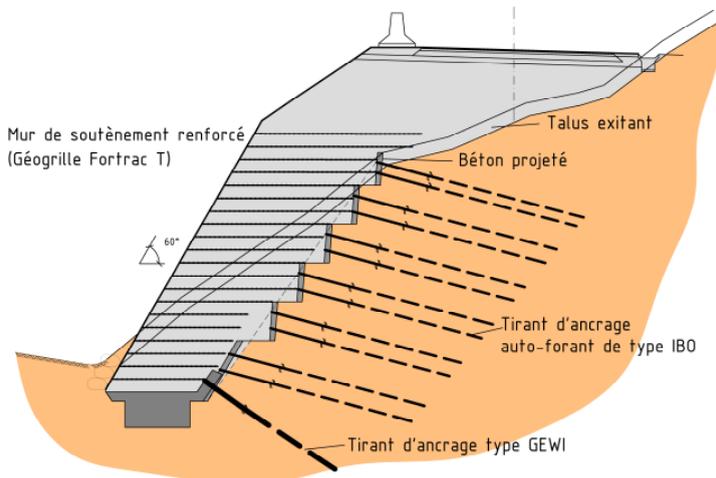


Figure 10. Schéma de principe d'une coupe transversal type

La géométrie extérieure de l'ouvrage prise comme base de calcul a été choisie en tenant compte du tracé prévu de la route et de manière à avoir un ouvrage le plus homogène possible pour le corps de la future chaussée dans la zone de la fondation. Une coupe transversale type de l'ouvrage est illustrée sur la figure 10.

La configuration topographique et géologique des lieux a constitué un défi de taille pour l'entreprise en charge des travaux. La zone du chantier était située pour une grande partie sur un terrain extrêmement pentu. Les voies de chantier aménagées étaient de largeur minimale (figure 11), avec des déclivités importantes et des virages serrés, ce qui requérait d'optimiser le transport de matériaux et de matériels. Le recours aux géogrilles Fortrac® s'est révélé un atout précieux. Les géogrilles ont été découpées, pliées et mises en palettes sur un site central conformément aux plans de pose détaillés, transportées ensuite aisément jusqu'au lieu d'intervention.



Figure 11 : voies de chantier

Avant d'entamer la construction des murs de soutènement renforcés par géogrilles, il a fallu procéder à des purges partielles des débris des versants. Cette opération est réalisée par niveaux d'excavation de 2,0 m sécurisée par une structure renforcée en béton projeté de 15 cm d'épaisseur et par des tirants d'ancrages. Dans certaines zones critiques, le 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 était nécessaire. 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. La surface en béton a été spécialement striée de manière à obtenir une liaison sûre entre le pied en béton à ancrage arrière et la surface d'appui du mur de soutènement renforcé par géogrilles. Ensuite une couche de grave a été déposée avant d'appliquer la première nappe de géogrille. Vu que la longueur des géogrilles est réduite à la base de l'ouvrage renforcé, une attention particulière a été apportée à la liaison entre les géogrilles et le matériau de remblaiement. L'ouverture de maille des géogrilles utilisées a été adaptée au matériau de remblaiement utilisé pour ce projet et était de 70 x 70 mm.

Pour la confection du parement et le support de végétalisation, des treillis métalliques repliés, ont été utilisés. Comme les treillis métalliques n'ont pas fait l'objet de revêtement spécial et ne sont pas protégés contre la corrosion par conséquent; ils ne peuvent pas 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 les terres sur l'enveloppe extérieure du talus, il a été intégré des géogrilles, posées avec un rabat. Un géotextile spécial de protection a été incorporé à l'ensemble pour éviter l'érosion des particules fines et de la couche d'adhérence pour l'hydro-ensemencement (figure 12).

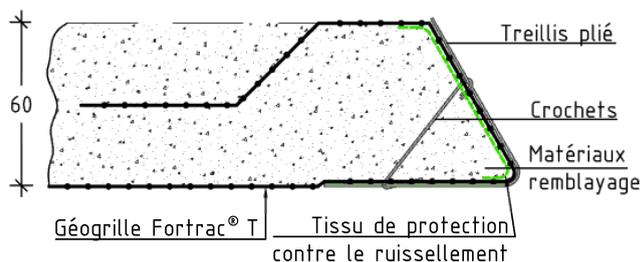


Figure 12. Schéma de principe du parement avec rabat et végétalisation

La végétalisation par hydro-ensemencement a eu lieu dès l'achèvement des talus. L'expérience a montré que cette manière de faire est à la fois sûre à long terme, pratique et peu onéreuse.

Le suivi des déformations des différents ouvrages et de l'ensemble du versant pour vérifier l'efficacité des mesures de confortement était possible grâce à la métrologie mise en place dès le début des travaux. Celle-ci comprenait un dispositif de points de mesure géodésiques à maillage fin, des inclinomètres et des capteurs de forces d'ancrage.

Le projet illustre l'efficacité des massifs renforcés par des géogrilles sur les plans technique, économique et écologique. Le comportement des géogrilles adaptées aux spécificités locales et la flexibilité d'aménagement du parement font de ce procédé une solution idéale. En plus du comportement flexible des structures, il permet une intégration optimale de l'ouvrage dans le paysage (figure 13).



vue partielle de talus renforcé par géo grille FORTRAC T dans la zone des virages juste avant l'autorisation du trafic, été 2008



vue partielle de talus renforcé par géo grille FORTRAC T dans la zone des virages en épingle, été 2011

Figure 13 : vues partielles de l'ouvrage renforcé par geogrilles et son intégration dans le paysage.

4. Bibliographie

- [1] D. Alexiew, K.H Blume. German long-term experience with reinforced embankments on soft subsoil: performance and durability. Proc. 11th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Eng., Foz do Iguassu; 1999.
- [2] D. Alexiew, K.H. Blume. Two reinforced embankments on soft soils: Experience after more than twenty years. Proc. 9th Int. Conf. on Geosynthetics, Guaruja. S. 1851-1854; 2010.
- [3] BAM (Schröder H.) (2004). Abschluss-bericht, Chemische Veränderungen von Geotextilien unter Bodenkontakt, Untersuchungen von ausgegrabenen Proben, Berlin.
- [4] BAST-Bericht S 44: Bürger, Blossfeld, Blume, Hillmann. 30 Jahre Erfahrungen mit Straßen auf wenig tragfähigem Untergrund. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch-Gladbach; 2005.
- [5] K.H. Blume. Großversuch zum Tragverhalten textiler Bewehrung unter einer Dammaufstandsfläche. Straße und Autobahn, Heft 06/95; 1995.
- [6] K.H. Blume. Long-term measurement on a road embankment reinforced with a high-strength geotextile. Proc. EuroGeo I, Maastricht, Balkema, Rotterdam, S. 237 – 244; 1996
- [7] K.H. Blume, R. Hillmann. Untersuchungen an geotextilbewehrten Dämmen auf Torf. Deutsche Baugrundtagung, Berlin, DGGT, S. 481 – 494; 1996
- [8] K.H. Blume, D. Alexiew D. Long-term experience with reinforced embankments on soft subsoil: Mechanical behavior and durability. Proc. 6th Int. Conf. on Geosynthetics, Atlanta, S. 663-668; 1998.
- [9] K.H. Blume, F. Glötzl, F. Anwendung der Beobachtungsmethode am Beispiel der BAB A 26. Tagungsband Erd- und Grundbautagung der FGSV 2003, Stade.
- [10] K.H. Blume, F.Glötzl, K. Lockemann. Construction of the Federal Highway A 26 in Germany: Foundation of reinforced dams in soft soils-application of the control method according to DIN 1054. Proc. EuroGeo 3, München, 2004.
- [11] K.H Blume, D. Alexiew, F. Glötzl. The new federal highway (Autobahn) A26 in Germany with high geosynthetic reinforced embankments on soft soils. Proc. of the 8th Int. Conf. on Geosynthetics, Yokohama, S. 912 – 916 ; 2006.
- [12] Huesker Synthetic GmbH (1990-2010). Stablenka[®] – Documentation technico-commerciale.