

RÉALISATION DE DEG SUR PENTES D'UNE VINGTAINNE DE RÉSERVOIRS POUR LA PRODUCTION DE NEIGE ARTIFICIELLE

GEOSYNTHETICS LINING DESIGN ON SLOPES OF 20 LARGE WATER RESERVOIRS FOR ARTIFICIAL SNOW PRODUCTION IN THE FRENCH ALPS

Patrick BROCHIER,
Teragéos, Veurey, France

RÉSUMÉ - Pour fabriquer de la neige, les stations de ski ont construit des bassins étanchés par géomembranes. Les terrassements, tant en déblais qu'en remblais sont nécessaires pour créer le volume de stockage sur des pentes, avec des digues qui atteignent 15m de hauteur et des rampants de talus de 30m et plus. Les sols rencontrés sont souvent hétérogènes, rocheux à argileux, passant par des moraines, sièges de nombreuses infiltrations, sans route d'accès au site. Le bassin doit assurer la fonction étanchéité au long des saisons, en conditions hivernales avec les congères de neige et glace, les vents violents, et en été sous un soleil ardent. Le système de produits décrit ici comprend une nappe drainante anti-poinçonnante sous la géomembrane et une nappe de protection et de renforcement au-dessus de l'étanchéité sous une couche de sol de 0,40m d'épaisseur. L'article décrit le dimensionnement de leur fonction principale, anti-poinçonnement, drainage, calcul de résistance et d'ancrage sur pente.

Mots-clé : drainage, étanchéité, géoconteneur, montagne, neige

ABSTRACT - Mountain reservoirs lined with geomembranes are built by ski resorts for artificial snow making. Difficult geotechnical conditions are due to slopes and heterogeneous type of soils with much seepage ground water. Embankments reach 15m in height with internal slopes of 30m in heterogeneous clay and rocks. The reservoir must be waterproof along the seasons whatever snow ice and wind or intense sunshine in summer. The system of geosynthetic products comprises three layers from bottom to top with a drainage layer on which the geomembrane is laid then topped with a protective retaining earth product under 40cm soil. The paper describes the design of these components in respect with their main functions drainage anti-puncturing waterproofing and tension and anchor on slopes.

Key-words: drainage, waterproofing, geomattress, mountain, snow

1. Introduction

Les stations de ski ont besoin de garantir à leur clientèle une neige toujours disponible pour permettre à leur clientèle de pratiquer leur loisir préféré. Les changements du climat associés à la pression financière sur "l'or blanc" nécessitent la création d'installation de production de neige artificielle pour sécuriser les investisseurs. Ces réservoirs d'eau sont généralement situés dans ou au-dessus du domaine skiable et constituent une pièce maîtresse du dispositif de production de neige ; ils doivent être étanches pour fournir de l'eau dès que de besoin. L'incapacité à opérer les installations de production de neige peut conduire à la perte de clientèle et à des revers financiers pour l'investisseur. La conception est critique en raison des risques géotechniques sévères en cas de fuite du réservoir. Certaines expériences malheureuses ont été subies du fait du choix d'une conception basée sur les usages appliqués aux bassins tampon de rétention pluvial en plaine, qui ont dans la réalité peu de point en commun. Les intervenants se sont davantage intéressés au type de géomembrane, plutôt qu'aux couches associées de drainage et de protection.

Une littérature spécialisée n'est à priori pas disponible sur ces applications.

Des tests de poinçonnement ont été réalisés dans une cellule expérimentale capable d'appliquer une pression de 400 kPa sur des échantillons de matériaux naturels du site et des dispositifs géosynthétiques de diamètre 50 cm. Les couches drainantes géosynthétiques sont dimensionnées par rapport au besoin du site. Le comportement de la géomembrane a été observé sur certains projets en relation avec la stabilité dimensionnelle in situ, ainsi qu'en relation avec sa « réparabilité ». Les coefficients de friction et sollicitations extérieures ont été utilisés pour calculer les forces dans le géosynthétique de protection et dans l'ancrage.

2 Protection anti-poinçonnante et drainage sous la géomembrane

2.1 Poinçonnement

Les sollicitations de poinçonnement retenues sont de trois types :

1. dynamiques durant les travaux ;
2. hydrostatiques (eau) et statiques (neige) ;
3. dynamiques sous la neige et la glace en mouvement.

Les sollicitations 1 et 3 sont les plus agressives avec le recul de l'expérience, et les plus difficiles à évaluer. La cellule expérimentale en figure 1 ci-dessous a été construite pour tester les DEG en contacts avec des matériaux naturels sous 400 kPa de pression. La cellule de test est autonome et peut être transportée sur le site pour une vérification avec les matériaux du chantier. Les géosynthétiques sont testés entre 30cm de matériaux de chaque côté.



Figure 1. Cellule de poinçonnement expérimental à 400kPa

La contrainte est appliquée pour une période de temps d'une heure généralement avant l'inspection des échantillons. Les déformations et les dégradations sont évaluées visuellement : les filtres perforés des géocomposites drainant, les âmes drainantes écrasées, les géomembranes trouées ou en déformation plastique, sont considérées comme des résultats négatifs. Certaines combinaisons de produits ne passent pas le test et doivent être rejetées. Les observations montrent que les endommagements sont concentrés dans les combinaisons de DEG qui comportent soit des points durs : dans ce cas les couches géosynthétiques sont agressives entre elles, soit des vides : dans ce cas ce sont les contours des vides qui sont agressés. Les géomembranes coincées au milieu, subissent soit des poinçonnements perforant ou coupures, soit des poinçonnements entraînant des déformations plastiques conduisant à l'amincissement.

Les résultats des tests expérimentaux orientent vers des couches anti-poinçonnantes non-tissées aiguilletées au dessus de 1000g/m². La valeur du test CBR n'est pas suffisant pour caractériser cette protection, car des produits tissés pourtant résistants ne donnent pas de bon résultat. Ni la valeur de la chute de cône, pas suffisamment discriminant, puisque des produits qui obtiennent 0mm ne passent pas forcément le test décrit ici.

2.2 Drainage

Dans ces ouvrages, il y a toujours des venues d'eau dans les talus amont en déblai. Etant donné que la géomembrane bloque les arrivées d'eau et empêche leur évacuation, le drainage des infiltrations en arrière de la géomembrane est nécessaire pour la stabilité des talus en déblai. Dans toutes les zones, et en particulier dans celles en remblai, le drainage est aussi nécessaire en tant que drainage de contrôle pour avertir d'une rupture de l'étanchéité. Ces couches drainantes sont au contact de la géomembrane, tandis que le drainage principal est réalisé en tranchées et en éperons traditionnels, figure 2, vers le regard de contrôle. En outre, elle constitue une surface d'écoulement imposée, ce qui provoque un lessivage du support. Ce lessivage du support explique que des surfaces satisfaisantes réceptionnées à l'heure des travaux se transforment et se dégradent au fil du temps ensuite, et transforme le support en un matériau de plus en plus agressif. Les cailloux ressortent.



Figure 2. Drainage principal sous le DEG

Les fonctions de protection anti-poinçonnante, de drainage en sous-face de la géomembrane, et de réduction du lessivage, sont combinées dans teradrain® un tapis drainant géosynthétique constitué de l'association de nappes non-tissées aiguilletées et d'un réseau de mini drains parallèle, figure 3.

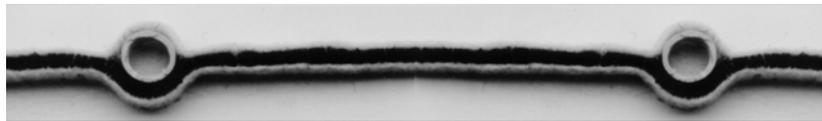


Figure 3. Section détaillée du tapis drainant géosynthétique

L'eau contenue dans le sol est filtrée par les faces extérieures du tapis géosynthétique en fonction de leur perméabilité et de leur ouverture de filtration EN ISO 11058 et EN ISO 11956 Fig. 4.

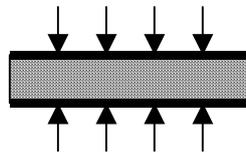


Figure 4. Mesure de la perméabilité du tapis drainant

Une fois à l'intérieur du tapis drainant, l'eau choisit le chemin le plus facile en direction des pertes de charge les plus fortes, c'est à dire perpendiculairement aux mini drains perforés, suivant la distance de drainage la plus courte dans le tapis drainant. EN ISO 12958 (figure 5).



Figure 5. Capacité de débit dans le plan perpendiculaire aux mini drains

L'eau entre facilement dans les mini drains : les perforations opposent des pertes de charge négligeables à l'écoulement apporté par la nappe non tissée aiguilletée. Ce comportement a été caractérisé expérimentalement au LIRIGM, Université de Grenoble (figure 6).



Figure 6. Mesure de la perte de charge à l'entrée des mini drains

La capacité de débit des mini drains a été mesurée au LIRIGM (figure 7). Elle suit la loi expérimentale suivante donnée par l'équation (1).

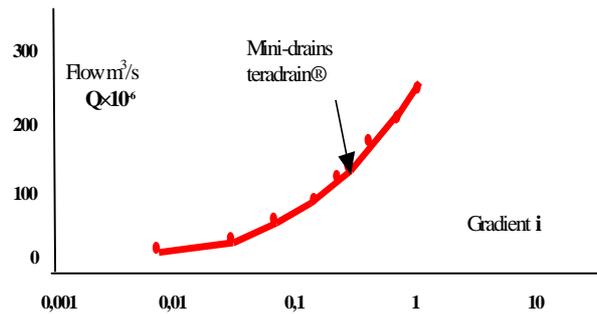


Figure 7. Mesure de la capacité de débit des mini drains

$$Q = \alpha \cdot i^{n+1} \quad \text{avec} \quad \alpha = 2,36 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \quad n = -0,461 \quad (1)$$

Avec :

Q = débit;

α = constante;

i = gradient hydraulique;

n = constante;

2.2.1 Application aux talus

Sur les pentes, le tapis drainant doit limiter les pressions interstitielles et la poussée sous la géomembrane. Le cas le plus critique au soulèvement de la géomembrane est à réservoir vide, tandis que le cas le plus critique pour la capacité de drainage du tapis drainant est à réservoir plein. On considère donc les caractéristiques du produit sous la charge maximum, et le réservoir vide. On doit vérifier que le réseau de mini drains fonctionne en non saturé de haut en bas du talus.

Les paramètres sont les suivants :

Longueur de pente = L = 30m

Pente avec l'horizontal = 22°

Capacité de débit dans le plan de la nappe entre les mini drains sous compression de 200kPa = $5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

Condition d'écoulement dans les mini drains = non saturé

Espacement entre les mini drains = 1m

Saturation acceptable dans le géotextile entre les mini drains = 0,02m

Résultats du calcul avec le logiciel Drainsoft® est présenté sur la figure 8 :

$F = 0,88 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2$

Ainsi $q = F \times L = 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}/\text{ml} = 0,94 \text{ m}^3/\text{h}/\text{ml}$

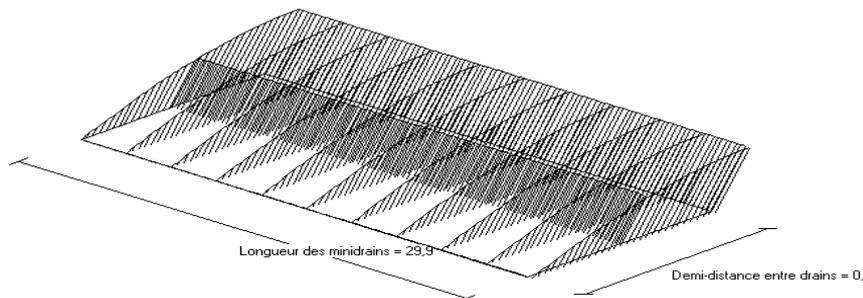


Figure 8 . Graphique de répartition des pressions hydrauliques entre les mini drains

2.2.2 Application au fond

Le tapis drainant est placé dans le fond de la retenue avec très peu de pente, et le réseau de mini drains est considéré saturé jusqu'aux tranchées drainantes principales. La condition au soulèvement est vérifiée

avec le poids de la lame d'eau en fond de bassin.

Longueur de drainage = $L = 20\text{m}$

Pente = 0

Capacité de débit dans le plan de la nappe entre les mini-drains sous compression de $200\text{kPa} = 5 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$

Conditions d'écoulement dans les mini-drains = saturé

Espacement entre les mini-drains = 1m

Saturation acceptable dans le produit entre les mini-drains = 0.13m ,

Ce qui donne $F = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}/\text{m}^2$

et $q = F \times L = 5,4 \cdot 10^{-5} \text{m}^3/\text{s}/\text{ml} = 0.19 \text{m}^3/\text{h}/\text{ml}$

Il faut vérifier que les drains principaux peuvent évacuer les débits cumulés collectés par le tapis drainant géosynthétique.

3 Géomembrane

L'étanchéité de certains lacs de montagne a été réhabilitée suite à un mauvais choix de géomembrane. Une géomembrane noire avec un coefficient de dilatation thermique élevé, mise en oeuvre sous le soleil, atteindra une température de 60 à 80°C et se dilatera. En basse température, disons -20°C , la géomembrane se rétractera et sera en tension aux points d'ancrage au béton et raccords soudés, voire en trampoline sur le fond. Les chutes de glace et de roches sont les principales causes d'endommagement des géomembranes exposées, accentué par l'état agressif du support. Plus de cent accrocs peuvent être observés sur les talus en géomembrane exposée en une saison, ce qui réclame un travail de maintenance année après année, et pose le critère de « réparabilité » de la géomembrane.

4 Dispositif de protection et d'accroche de terres (DPAT)

Une amélioration dans la conception consiste à protéger la géomembrane à long terme avec l'aide d'une couche de confinement. Cette option nécessite une étude adaptée et des conditions de mise en oeuvre particulières. Il faut considérer que le DEG est protégé mais qu'il est aussi ensuite inaccessible. Le dispositif de protection et d'accroche est un produit manufacturé original et exclusif en non-tissé aiguilleté, composé d'un fond épais anti-poinçonnant et renforcé, surmonté de bandes torsadées filtrantes de retenue de terre. Les renforts incorporés au produit permettent d'obtenir le module adéquat pour la reprise des efforts de traction sur la géomembrane glissante. Ce dispositif de protection et d'accroche de terre (DPAT) est prêt à l'emploi en une seule couche mono bloc, et permet d'équiper des pentes de 30m et plus de couvertures de 50cm d'épaisseur (figure 9).

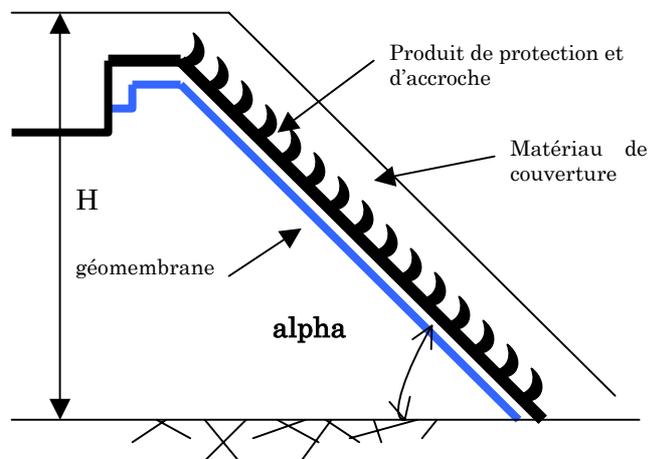


Figure 9. système teracro® placé sur la géomembrane et ancré

4.1 Tension dans le produit

Hauteur = H ;

Angle de pente = α ;

Longueur de pente = $H / \sin\alpha$;
 Poids du sol = P_v ;
 Epaisseur de sol = E_p ;
 Poids de la neige = S_n ;
 Frottement entre le produit et la géomembrane = Ψ ;
 Facteur de sécurité sur la neige = F_{sn}
 Facteur de sécurité sur le frottement = $F(\Psi)$
 Facteur de sécurité sur le poids volumique du sol = F_w
 Facteur de sécurité sur la traction = F_r
 Force motrice :
 $E_m = (P_v \times F_w \times E_p + S_n \times F_{sn}) \times H$
 Force résistante
 $E_r = (P_v \times F_w \times E_p + S_n \times F_{sn}) \times \text{tg}(\Psi) / F(\Psi) \times L \times \cos\alpha$
 Traction dans le produit
 $T_{adm} = (E_m - E_r) \times F_{adm}$
 Traction nominale du produit = T
 Valeur typique $T = T_{adm} \times F_r = 160 \text{ kN/m}$ Fig 10.



Figure 10. Vue détaillée du Dispositif de Protection et d'Accroche Terre

4.2 Ancrage du produit

La force d'ancrage est calculée en considérant les forces de friction (Hulling et Sansone, 1997) (figure 11)

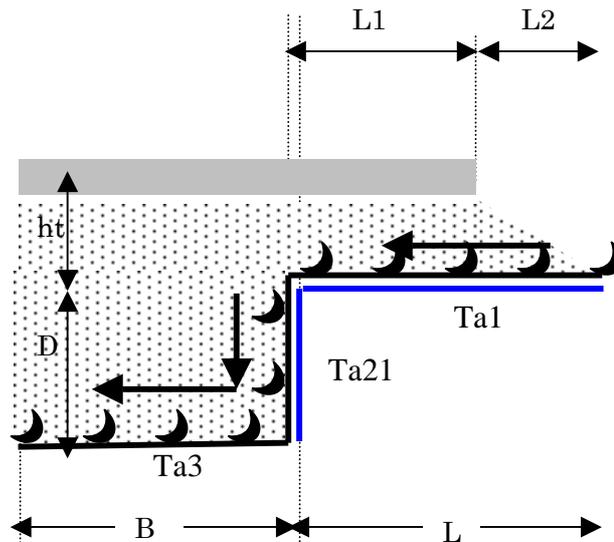


Figure 11. tranchée d'ancrage du Dispositif de Protection et d'Accroche Terre

Frottement entre le produit et le sol = Ψ' ;
 $T_{at} = T_{a1} + T_{a21} + T_{a3}$
 $T_{a3} = 2\gamma B (D+ht) \times (\tan\Psi')$
 $T_{a21} = K_0 \gamma D (ht + D/2) \times (\tan\Psi' + \tan\Psi)$

$$Ta1 = \gamma ht (L1 \times \tan \Psi + L2/2 \times \tan \Psi)$$

Valeurs typiques B = 1,60m; D = 1m; ht = 0,50m; L1+L2 = 1,50m.

5. Conclusions

Lorsqu'on pense à l'étanchéité d'un bassin, d'une retenue, ou d'un réservoir, on pense systématiquement d'abord à la géomembrane. Dans des conditions alpines, ces projets très exigeant en géotechnique et en sécurité, nécessitent de concentrer la conception et la mise en oeuvre sur les couches drainantes de sous-face, et les couches de protection sur la géomembrane. L'expérience montre que les projets conçus et réalisés dans certaines conditions, ne nécessitent aucune réparation au fil des années, malgré la neige, la glace et les UV. Ces solutions apportent sérénité à l'exploitant au fil des saisons, et sécurisent l'investissement géosynthétique en étanchéité. Les caractéristiques simplifiées typiques de ces DEG sont les suivantes :

- tapis anti-poinçonnant non-tissé aiguilleté 1000g/m² drainant avec capacité débit dans le plan 2×10^{-4} m²/s sous 200kPa à long terme
- géomembrane 1,5mm à 2mm peu sensible à la prise de température et aux déformations thermiques, aux assemblages contrôlables en double soudure, et facile à réparer
- dispositif de protection et d'accroche terre 1000g/m² non-tissé aiguilleté, avec résistance en traction polyester 160 kN/m, avec reliefs filtrant décimétriques

La première retenue équipée a été réalisée en 1997 et n'a pas nécessité de réparations en 9 ans d'exploitation. Aucune perte d'eau n'a été constatée ni en variation de niveau, ni en débit de fuite dans le drain de contrôle. Ainsi protégée, l'étanchéité a une durée de vie élevée.

6. Références bibliographiques

Hulling D.E., Sansone L.J. (1997) Design concerns and performance of geomembrane anchor trenches, Geotextiles and Geomembranes, Vol. 15, 403-417.