

ANNEXE C – ANALYSE DES COMPOSANTES GÉOSYNTHÉTIQUES

1. Renforcement dans les pentes

Notes :

- le géotextile est requis dans les pentes pour la protection de la géomembrane PEHD ;
- le géotextile doit agir comme couche de renforcement pour soutenir le poids de la couche drainante ;
- le géotextile doit avoir son ancrage propre afin d'assumer son rôle de renforcement ;

Référence : « Designing with Geosynthetics », Koerner, R.M., 4th Edition, 1998

$$T_{acc} = T_{ult} \left[\frac{1}{RF_{ID} \times RF_{CR} \times RF_{CD} \times RF_{BD}} \right]$$

Où

- T_{acc} = tension acceptable dans le géotextile
 T_{ult} = tension ultime permise dans le géotextile (selon le manufacturier)
 RF_{ID} = facteur de réduction pour le dommage résultant de l'installation
= 1,5
 RF_{CR} = facteur de réduction pour le fluage à long terme
= 1,0 Note : le fond du site sera rempli assez rapidement, réduisant cet effet
 RF_{CD} = facteur de réduction pour la dégradation chimique
= 1,0 Note : le fond du site sera rempli assez rapidement, réduisant cet effet
 RF_{BD} = facteur de réduction pour la dégradation biologique
= 1,0 Note : le fond du site sera rempli assez rapidement, réduisant cet effet

Donc,

$$T_{acc} = T_{ult} \left[\frac{1}{1,5 \times 1,0 \times 1,0 \times 1,0} \right]$$

- T_{ult} pour géotextile TEXEL 918
= 31,8 kN/m (sens machine) *Valeur fourni par le fabricant, communication personnelle

Donc,

$$T_{acc} = \frac{31,8}{1,5} = 21,2 \text{ kN/m}$$

Selon Koerner :

$$FS_{global} = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

= facteur de sécurité global

Où :

$$a = (W_a - N_a \cos \beta - T \sin \beta) \cos \beta$$

$$b = -[(W_a - N_a \cos \beta - T \sin \beta) \sin \beta \tan \phi + (N_a \tan \delta + C_a) \sin \beta \cos \beta + \sin \beta (C + W_p \tan \phi)]$$

$$c = (N_a \tan \delta + C_a) \sin^2 \beta \tan \phi$$

Où :

W_a = poids du polygone actif

$$W_a = gh^2 \left[\frac{L}{h} - \frac{1}{\sin b} - \frac{\tan b}{2} \right]$$

γ = poids unitaire du sol de recouvrement
= 17,6 kN/m

h = épaisseur du sol de recouvrement
= 0,5 m

β = angle de la pente
= 16,7°

L = longueur totale de la pente
donc = 44 m (pire cas)

$$W_a = 20(0,5)^2 \left[\frac{44}{0,5} - \frac{1}{\sin 16,7^\circ} - \frac{\tan 16,7^\circ}{2} \right]$$

$$= 421,9 \text{ kN/m}$$

$$\begin{aligned} N_a &= \text{force effective perpendiculaire à la surface de glissement, due au polygone actif} \\ &= W_a \cos \beta \\ &= 421,9 \cos 16,7^\circ = 404,11 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} C_a &= \text{force d'adhésion entre le sol de recouvrement et la géomembrane} \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \phi &= \text{angle de frottement interne du sol de recouvrement (pierre)} \\ &= 35^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta &= \text{angle de frottement entre le géotextile et la géomembrane} \\ &= 8^\circ \end{aligned}$$

$$T = T_{adm}$$

$$\begin{aligned} C &= \text{force de cohésion à la surface de glissement dans le polygone passif} \\ &= 0 \end{aligned}$$

$$W_p = \frac{\gamma h^2}{\sin 2\beta} = \frac{20 (0,5)^2}{\sin (2 \times 16,7^\circ)} = 9,08 \text{ kN/m}$$

Donc,

$$\begin{aligned} a &= [(421,9 - 404,11 \cos (16,7^\circ) - 21,2 \sin (16,7^\circ))] \cos (16,7^\circ) \\ &= 27,53 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b &= -[(421,9 - 404,11 \cos (16,7^\circ) - 21,2 \sin (16,7^\circ)) \sin (16,7^\circ) \tan (35^\circ)] + \\ &\quad [(404,11 \tan (8^\circ) + 0) \sin (16,7^\circ) \cos (16,7^\circ)] + \sin (16,7^\circ) (0 + 9,08 \tan (35^\circ)) \\ &= -23,24 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c &= (404,11 \tan (8^\circ) + 0) \sin^2 (16,7^\circ) \tan (35^\circ) \\ &= 3,28 \end{aligned}$$

$$FS_{global} = \frac{-(-23,24) + \sqrt{(-23,24)^2 - 4(27,53)(3,28)}}{2(27,53)}$$

$$= 0,665$$

Donc, le géotextile proposé (TEXEL 918) n'a pas la capacité requise pour soutenir le poids de la pierre nette sur la pente de 44 mètre de longueur. Il est proposé tout de même d'utiliser ce géotextile, en prévoyant aménager la couche drainante par étage, au fur et à mesure du remplissage des déchets.

Deux (2) facteurs sont à considérer, soit :

- la force résultante de la couche de déchets vers le bas
- la force générée par la couche partielle de pierre nette, en montant la couche drainante par pallier

1.1 TENSION CRÉÉE PAR LES DÉCHETS

Référence : « Designing with geosynthetics », Koerner, R.M., 1994, p. 545

$$\begin{aligned}W_w &= \text{poids du polygone de déchets considéré et couche drainante (} \\ &= \frac{1}{2} \times (6,7 \text{ m}) (2\text{m}) \times 1,0 \text{ t/m}^3 \\ &= 6,7 \text{ t/m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}T_w &= \text{force de résistance interne des déchets} \\ &= \sigma_h \tan\phi(D) \\ &= K_o \sigma_v \text{ moyenne} \tan\phi(D) \text{ (à mi-couche)} \\ &= (1 - \sin\phi) h_{\text{moy}} \gamma \tan\phi(D) \\ &= (1 - \sin 40) (0,5) (2,0) (1,0) \tan (40) (2) \\ &= 0,6 \text{ t/m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}W_{\text{net}} &= W_w - T_w \\ &= 6,7 - 0,6 \\ &= 6,1 \text{ t/m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}W \cos\beta &= \text{composante normale à la pente} \\ &= 5,84 \text{ t/m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}F_1 &= \text{force à la surface entre la pierre nette et le géotextile créée par les déchets} \\ &= (W \cos\beta) \tan\delta \\ &= (5,84) \tan 25^\circ \\ &= 2,72 \text{ t/m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}F_2 &= \text{force résistante à la surface entre le géotextile et la géomembrane} \\ &= (W \cos\beta) \tan\delta_2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= (5,84) \times \tan 10^\circ \\ &= 1,03 \text{ t/m} \end{aligned}$$

$F_1 > F_2$, donc géotextile sera en tension

$F_1 - F_2 =$ force qui doit être prise par le géotextile

$$= 2,72 - 1,03$$

$$= 1,7 \text{ t/m}$$

$$= 17 \text{ kN/m}$$

Donc, tension maximum qui doit être supportée par le géotextile dû au couvert de pierre nette :

$$\begin{aligned} &= T_{\text{ult géotextile}} - T_{\text{déchets}} \\ &= 21,20 - 17 \\ &= 4,2 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

1.2 TENSION CRÉÉE PAR LE COUVERT DE PIERRE NETTE

Référence : « Stability fo Soil Layers on Geosynthetic Lining Systems », Giroud, J.P. et Beech, J.F, Geosynthetic '89 Conference

$\alpha =$ tension dans le géosynthétique de renforcement

$$a = \frac{g_c T_c^2}{\sin 2b} \left[\left(\frac{2H \cos b}{T_c} - 1 \right) \frac{\sin(b - f_1)}{\cos f_1} - \frac{\sin f_c}{\cos(b + f_c)} \right]$$

Où :

$\gamma_c =$ poids unitaire du sol de recouvrement
 $= 18 \text{ kN/m}^3$

$T_c =$ épaisseur du sol de recouvrement
 $= 0,5 \text{ m}$

H = hauteur de la pente permise (inconnue)

β = pente = $16,7^\circ$

ϕ_1 = angle de frottement entre le géotextile de renforcement et la géomembrane
= 10°

ϕ_c = angle de frottement du sol de recouvrement
= 35°

Dans ce cas,

α = α_{adm} = 4,2 kN/m

Donc,

$$4,2 = \frac{18(0,5)^2}{\sin(2 \times 16,7^\circ)} \left[\left(\frac{2H \cos 16,7^\circ}{0,5} - 1 \right) \frac{\sin(16,7^\circ - 10^\circ)}{\cos 10^\circ} - \frac{\sin 35^\circ}{\cos(16,7^\circ + 35^\circ)} \right]$$

$$2,66 = 8,175[(3,83H - 1)0,1185 - 0,93]$$

$$H = 2,89 \text{ m}$$

Donc, il est proposé d'installer la couche de pierre en pallier de 2,89 m / FS (facteur de sécurité) de hauteur. Une couche de 2 m de déchets devra être posée avant d'installer le deuxième niveau de pierre et ainsi de suite pour chacune des couches de pierre.

2 Autres composantes géosynthétiques

		Angles de frottement à l'interface
Profil	1. 0,5 m pierre nette (ø 5-14 mm)	25°
	2. géotextile non tissé	10°
	3. géomembrane PEHD	8°
	4. géofilet	8°
	5. géomembrane PEHD	8°
	6. natte bentonitique	22°
	7. sol d'infrastructure	

Note : Les couches 1 et 2 ont été analysées à la section précédente

2.1 COUCHE 3

$$\begin{aligned}F_{2-3} &= \text{force à l'interface 2-3} \\ &= (\text{force normale à l'interface}) (\tan\delta_{2-3}) \\ &= ([\text{poids des déchets}] + [\text{poids de la couche de protection}]) (\tan\delta_{2-3}) \\ &= [(1/2 \times 6,7\text{m} \times 2\text{m} \times 10 \text{ kN/m}^3 + 0,5\text{m} \times 7\text{m} \times 18 \text{ kN/m}^3 \cos 16,7^\circ)] \tan (10^\circ) \\ &= 124,5 \times \tan (10^\circ) \\ &= 21,95 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}F_{3-4} &= \text{force résistante à l'interface 3-4} \\ &= \text{force normale } (\tan\delta_{3-4}) \\ &= 124,5 (\tan 8^\circ) \\ &= 17,5 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

Tension dans la couche 3

$$\begin{aligned}&= F_{2-3} - F_{3-4} \\ &= 21,95 - 17,5 \\ &= 4,5 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

< limite élastique géomembrane PeHD 1,5 mm (= 22 kN/m), devis technique ASA

2.2 COUCHE 4

$$\begin{aligned} F_{3-4} &= \text{force résistante à l'interface 3-4} \\ &= \text{force normale } (\tan\delta_{3-4}) \\ &= 124,5 (\tan 8^\circ) \\ &= 17,5 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{4-5} &= \text{force à l'interface 4-5} \\ &= \text{force normale } (\tan\delta_{4-5}) \\ &= 17,5 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{Tension dans la couche 4} \\ &= F_{3-4} - F_{4-5} \\ &= 0,0 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

2.3 COUCHE 5

$$\begin{aligned} F_{4-5} &= \text{force à l'interface 4-5} \\ &= 17,5 \text{ kN/m} \\ F_{5-6} &= \text{force à l'interface 5-6} \\ &= \text{force normale } (\tan\delta_{5-6}) \\ &= 124,5 (\tan 8^\circ) \\ &= 17,5 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{Tension dans la couche 5} \\ &= F_{4-5} - F_{5-6} \\ &= 0,0 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

2.4 COUCHE 6

$$\begin{aligned} F_{5-6} &= \text{force à l'interface 5-6} \\ &= 17,5 \text{ kN/m} \\ F_{6-7} &= \text{force à l'interface 6-7} \\ &= \text{force normale } (\tan\delta_{5-6}) \\ &= 124,5 (\tan 22^\circ) \\ &= 50,3 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{Tension dans la couche 6} \\ F_{5-6} &< F_{6-7} \quad \text{donc aucune tension} \end{aligned}$$

3 Calcul de l'ancrage

Référence : « Designing with geosynthetics », Koerner, Robert, Prentice Hall 3rd Edition, 1994

Deux membranes sont en tension, soit le géotextile de protection et la géomembrane 1^{er} niveau.

3.1 GÉOMEMBRANE

Référence : «Designing with geosynthetics», Koerner, R., 1998, p. 487

$$T_{\text{calc}} \cos\beta = F_{uS1} + F_{LS1} + F_{LT1} - P_A + P_P + F_{uS2} + F_{LS2} + F_{LT2}$$

avec

F_{uS1}, F_{uS2} = Effort de cisaillement au-dessus de la géomembrane dû au poids du sol.

F_{LS1}, F_{LS2} = Effort de cisaillement sous la géomembrane dû au poids du sol.

F_{LT1} = Effort de cisaillement sous la géomembrane dû à la composante verticale de la tension dans la géomembrane.

P_A = Pression du remblai de la clé d'ancrage sur la géomembrane.

P_P = Pression du sol en place du côté externe de la clé d'ancrage sur la géomembrane.

L_1 = Longueur horizontale à l'extérieur de la tranchée

L_2 = Longueur horizontale à l'intérieur de la tranchée

F_{uS1} = 0 (néglige la force au dessus de la membrane)

$$\begin{aligned} F_{LS1} &= s_n \tan d_L (L_1) \\ &= (0,5 \times 18) \tan (8^\circ) (0,6) \\ &= 0,76 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{LT1} &= 0,5[(2 \times T_{\text{calc}} \sin \beta)/L_{RO}] \times L_{RO} \tan d_L \\ &= 0,5[(2 \times 4,25 \sin(16,7^\circ))/0,6] \times 0,6 \tan(8^\circ) \\ &T_{\text{calc}} : (\text{voir la tension créée par le couvert de pierre de la couche 3}) \\ &= 0,17 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{uS2} &= s_{n2} \tan d_u (L_2) \\ &= [(0,5 \times 18) + (0,6 \times 18)] \tan (15^\circ) 0,8 \quad d_{\text{PeHD-sol}} = 15^\circ \\ &= 4,24 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{LS2} &= s_{n2} \tan d_L (L_2) \\ &= [(0,5 \times 18) + (0,6 \times 18)] \tan (8^\circ) 0,8 \\ &= 2,23 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_A &= (0,5 \gamma d + s_n) K_A d \\
 &= [(0,5 \times 18 \times 0,6) + (0,5 \times 18)] \tan^2 (45-35^\circ/2) \times 0,6 \\
 &= 2,34 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_P &= (0,5 \gamma d + s_n) K_P d \\
 &= [(0,5 \times 18 \times 0,6) + (0,5 \times 18)] \tan^2 (45 + 35/2) \times 0,6 \\
 &= 31,88 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 ? &= F_{uS1} + F_{LS1} + F_{LT1} + F_{uS2} + F_{LS2} + P_P - P_A \\
 ? &= 0 + 0,76 + 0,17 + 4,24 + 2,23 + 31,88 - 2,34 \\
 ? &= 36,94 \text{ kN/m} \\
 \text{Force d'ancrage} &= 36,94 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

Facteur de sécurité de l'ancrage

$$\begin{aligned}
 FS &= \text{Force ancrage} / T_{ult} \cos \beta \quad T_{ult} \text{ géomembrane} = 22 \text{ kN/m} \\
 FS &= 36,94 / 22 \cos (16,7^\circ) \\
 FS &= 1,75
 \end{aligned}$$

Facteur de sécurité de l'ancrage vis-à-vis la tension générée dans la géomembrane

$$\begin{aligned}
 FS &= \text{Force ancrage} / T_{générée} \cos \beta \quad T_{générée} \text{ géomembrane} = 4,25 \text{ kN/m} \\
 FS &= 36,94 / 4,25 \cos (16,7^\circ) \\
 FS &= 9,1
 \end{aligned}$$

3.2 GÉOTEXTILE DE PROTECTION

$$T = F_{uS1} + F_{LS1} + F_{LT1} + F_{uS2} + F_{LS2} + F_{uS3} + F_{LS3}$$

$$F_{uS1} = 0$$

$$\begin{aligned}
 F_{LS1} &= (0,5 \times 18) \tan (10^\circ) 0,6 \\
 &= 0,95 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{LT1} &= 0,5[(2 \times 21,2 \sin(16,7^\circ))/0,6] \times 0,6 \tan(10^\circ) \\
 T_{calc} &: \text{(voir la tension max admissible sur le géotextile)} \\
 &= 1,07 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

Calcul du frottement sur le géotextile dans la portion inclinée

$$\begin{aligned}
 F_{LS2} &= P_v \cos(\alpha) \tan(d_L) && d_L = 25. \text{ frottement sol-géotextile} \\
 &= (\gamma d_s + 0,5 \gamma d_a) L_R / \cos(\alpha) \cos(\alpha) \tan(d_L) && \alpha = 25^\circ \text{ angle ancrage} \\
 &= (18 \times 0,5 + 0,5 \times 18 \times 0,6) \times 1,3 / \cos(25^\circ) \times \cos(25^\circ) \times \tan(25^\circ) \\
 &= 8,7 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

$$F_{US2} = F_{LS2} = 8,7 \text{ kN/m}$$

Calcul du frottement à la base de la tranchée

$$\begin{aligned}
 F_{LS3} &= (0,5 \times 18 + 0,6 \times 18) \tan(25^\circ) \times 0,5 \\
 &= 4,61 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

$$F_{US3} = F_{LS3} = 4,61 \text{ kN/m}$$

$$\begin{aligned}
 ? &= F_{US1} + F_{LS1} + F_{LT1} + F_{LS2} + F_{US2} + F_{LS3} + F_{US3} \\
 ? &= 0 + 0,95 + 1,07 + 8,7 + 8,7 + 4,61 + 4,61 \\
 ? &= 28,7 \text{ kN/m} \\
 \text{Force d'ancrage} &= 28,7 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

Facteur de sécurité de l'ancrage

$$\begin{aligned}
 FS &= \text{Force ancrage} / T_{acc} && T_{acc} \text{ géotextile} = 21,2 \text{ kN/m} \\
 FS &= 28,7 / 21,2 \\
 FS &= 1,35
 \end{aligned}$$