

---

## **ANNEXE D – Analyse des géosynthétiques**

## 1. Renforcement dans les pentes

Notes :

- Les calculs ont été réalisés à l'aide des informations présentées dans le cadre de l'élaboration des aspects techniques l'étude d'impacts pour l'ensemble du projet d'aménagement du LET ;
- 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 ;
- calculs réalisés selon « Analysis and design of veneer cover soils » par Koerner R.M. et Te Yang Soong dans « Static and seismic slope stability for waste containment facilities », notes de cours, Université du Wisconsin, avril 1998.

$$T_{acc} = T_{ult} \left[ \frac{1}{RF_{id} \times RF_{cr} RF_{cbd}} \right]$$

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

$RF_{cbd}$  = facteur de réduction pour la dégradation chimique et biologique

= 1,0 Note : le fond du site sera rempli assez rapidement, réduisant cet effet

Donc,

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

$T_{ult}$  pour géotextile 918 (Texel)  
= 31,8 kN/m (sens machine)

Donc,

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

Selon Koerner et Soong :

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

= 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 :

$$W_a = \text{poids du polygone actif}$$

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

$$\gamma = \text{poids unitaire du sol de recouvrement}$$

$$= 17,6 \text{ kN/m}$$

h = épaisseur du sol de recouvrement

$$= 0,5 \text{ m}$$

$\beta$  = angle de la pente

$$= 16,7^\circ$$

L = longueur totale de la pente

donc = 36,5 m (pire cas)

$$W_a = 17,6(0,5)^2 \left[ \frac{36,5}{0,5} - \frac{1}{\sin 16,7^\circ} - \frac{\tan 16,7^\circ}{2} \right]$$

$$= 305,23 \text{ kN/m}$$

$N_a$  = force effective perpendiculaire à la surface de glissement, due au polygone actif

$$= W_a \cos \beta$$

$$= 305,23 \cos 16,7$$

$$= 292,35 \text{ kN/m}$$

$C_a$  = force d'adhésion entre le sol de recouvrement et la géomembrane

$$= 0$$

$\phi$  = angle de frottement interne du sol de recouvrement

$$= 35^\circ$$

$\delta$  = angle de frottement entre le géotextile et la géomembrane

$$= 8^\circ$$

$$T = T_{adm}$$

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

$$W_p = \frac{\gamma h^2}{\sin 2\beta} = \frac{17,6 (0,5)^2}{\sin (2 \times 16,7)} = 7,99 \text{ kN/m}$$

Donc,

$$a = [(305,23 - 292,35 \cos (16,7) - 21,2 \sin (16,7)) \cos (16,7)]$$
$$= 18,31$$

$$b = -[(305,23 - 292,35 \cos (16,7) - 21,2 \sin (16,7)) \sin (16,7) \tan (35)] +$$
$$[(292,35 \tan (8) + 0) \sin (16,7) \cos (16,7)] + \sin (16,7) (0 + 7,99 \tan (35))$$
$$= -16,75$$

$$c = (292,32 \tan (8) + 0) \sin^2 (16,7) \tan (35)$$
$$= 2,37$$

$$FS_{global} = \frac{-(-16,75) + \sqrt{(-16,75)^2 - 4(18,31)(2,37)}}{2(18,31)}$$
$$= 0,457$$

Donc, le géotextile proposé (918) n'a pas la capacité requise pour soutenir le poids de la pierre nette sur la pente. 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 :

1. la force résultante de la couche de déchets vers le bas
2. la force générée par la couche partielle de pierre nette

## 1.1 Tension créée par les déchets

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

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

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

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

$$\begin{aligned}W \cos\beta &= \text{composante normale à la pente} \\ &= 5,76 \text{ t/m}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}F_1 &= \text{force à la surface entre la pierre nette et le géotextile créée par les déchets} \\ &= (W \cos\beta) \tan\delta_1 \\ &= (5,76) \tan 25^\circ \\ &= 2,68 \text{ t/m}\end{aligned}$$

$$F_2 = \text{force résistante à la surface entre le géotextile et la géomembrane}$$

$$= (W \cos \beta) \tan \delta_2$$

$$= (5,76) \times \tan 8^\circ$$

$$= 0,81 \text{ t/m}$$

$F_1 > F_2$ , donc géotextile sera en tension

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

$$= 2,68 - 0,81$$

$$= 1,87 \text{ t/m}$$

$$= 18,34 \text{ kN/m}$$

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

$$= 21,20 - 18,34$$

$$= 2,86 \text{ kN/m}$$

## 1.2 Tension créée par le couvert de pierre nette

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

$\alpha =$  tension dans le géosynthétique de renforcement

$$\alpha = \frac{\gamma_c T_c^2}{\sin 2\beta} \left[ \left( \frac{2H \cos \beta}{T_c} - 1 \right) \frac{\sin(\beta - \phi)}{\cos \phi_1} - \frac{\sin \phi_c}{\cos(\beta + \phi_c)} \right]$$

Où :

$\gamma_c =$  poids unitaire du sol de recouvrement

$$= 17,6 \text{ kN/m}$$

- $T_c$  = épaisseur du sol de recouvrement  
= 0,5 m  
 $H$  = hauteur de la pente permise (inconnue)  
 $\beta$  = pente =  $16,7^\circ$   
 $\phi_1$  = angle de frottement entre le géotextile de renforcement et la géomembrane  
=  $8^\circ$   
 $\phi_c$  = angle de frottement du sol de recouvrement  
=  $35^\circ$

Dans ce cas,

$$\alpha = \alpha_{adm} = 2,86 \text{ kN/m}$$

Donc,

$$2,86 = \frac{17,6(0,5)^2}{\sin(2 \times 16,7)} \left[ \left( \frac{2H \cos 16,7}{0,5} - 1 \right) \frac{\sin(16,7 - 8)}{\cos 8} - \frac{\sin 35}{\cos(16,7 + 35)} \right]$$

$$2,86 = 7,99[(3,83H - 1)0,15 - 0,93]$$

$$H = 2,50 \text{ m}$$

Dans le cas des phases 2 et 3, la pierre nette devra être installée sur les pentes de façon progressive par hauteur successive de 2,5 m sauf si une butée importante de déchet est initialement construite à la base des talus en excavation.

## 2. Autres composantes géosynthétiques

Profil :		Angles de frottement à l'interface
	Couche 1. 50 cm pierre nette	25°
	Couche 2. géotextile non tissé	10°
	Couche 3. géomembrane PEHD	7°(min)
	Couche 4. géofilet	7°(min)
	Couche 5. géomembrane PEHD	10°
	Couche 6. natte bentonitique	15°
	Couche 7. argile	

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

### 2.1 Couche 3 (géomembrane PEHD)

$$\begin{aligned}
 F_{2-3} &= \text{force à l'interface 2-3} \\
 &= (\text{force normale à l'interface}) (\tan\delta_{2-3}) \\
 &= ([\text{poids des déchets}] + [\text{poids de la couche de protection}]) (\tan\delta_{2-3}) \\
 &= \left[ \left( 5,75 \times 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \times 9,81 \frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{s}^2} \right) \cos 16,7 \right] + \left( 0,5 \text{ m} \times 8,7 \text{ m} \times 17,6 \text{ kN} / \text{m}^3 \cos 16,7 \right) \tan (10) \\
 &= 127,45 \times \tan (10) \\
 &= 22,47 \text{ kN/m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{3-4} &= \text{force résistante à l'interface 3-4} \\
 &= \text{force normale } (\tan\delta_{3-4})
 \end{aligned}$$

$$= 127,45 (\tan 7)$$

$$= 15,64 \text{ kN/m}$$

Tension dans la couche 3

$$= F_{2-3} - F_{3-4}$$

$$= 22,47 - 15,64$$

$$= 6,83 \text{ kN/m}$$

$$< \text{ limite élastique géomembrane PeHD 1,5 mm (= 24,5 kN/m)}$$

## 2.2 Couche 4 (géofilet)

$$F_{3-4} = \text{force à l'interface 2-3}$$

$$= \text{force normale } (\tan \delta_{3-4})$$

$$= 127,45 (\tan 7)$$

$$= 15,65 \text{ kN/m}$$

$$F_{4-5} = \text{force à l'interface 4-5}$$

$$= \text{force normale } (\tan \delta_{4-5})$$

$$= 15,65 \text{ kN/m}$$

$$F_{3-4} = F_{4-5} \text{ donc aucun tension}$$

## 2.3 Couche 5 (geomembrane PEHD)

$$F_{4-5} = \text{force à l'interface 4-5}$$

$$= 15,65 \text{ kN/m}$$

$$F_{5-6} = \text{force à l'interface 5-6}$$

$$= \text{force normale } (\tan \delta_{5-6})$$

$$= 127,45 (\tan 10)$$

$$= 22,47 \text{ kN/m}$$

$$F_{4-5} < F_{5-6} \quad \text{donc aucune tension}$$

#### 2.4 Couche 6 (natte bentonitique)

$$F_{5-6} = \text{force à l'interface 5-6}$$

$$= 22,47 \text{ kN/m}$$

$$F_{6-7} = \text{force à l'interface 6-7}$$

$$= \text{force normale } (\tan \delta_{5-6})$$

$$= 127,45 (\tan 15)$$

$$= 34,15 \text{ kN/m}$$

$$F_{5-6} < F_{6-7} \quad \text{donc aucune tension}$$

### 3. Ancrage

#### 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.

$F_{LT1}, F_{LT2}$  = 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.

$$\begin{aligned} F_{uS1} &= s_n \tan d_u (L_1) \\ &= (0,3 \times 17,6) (\tan (10)) (L_1) \\ &= 0,93 L_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{LS1} &= s_n \tan d_L (L_1) \\ &= (0,3 \times 17,6) (\tan (7)) (L_1) \\ &= 0,65 L_1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{LT1} = F_{LT2} &= T_{\text{calc}} \sin \beta \tan d_L \\ &= 6,62 \sin (16,7) \tan (7) \\ &= 0,23 \end{aligned}$$

$T_{\text{calc}}$  : (voir la tension créée par le couvert de pierre de la couche 3)

$$\begin{aligned} F_{uS2} &= s_{n2} \tan d_u (L_2) \\ &= [(0,3 \times 17,6) + (d \times 17,6)] \tan (10) L_2 \\ &= 0,93 L_2 + 3,10 d L_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{LS2} &= s_{n2} \tan d_L (L_2) \\ &= [(0,3 \times 17,6) + (d \times 17,6)] \tan (7) L_2 \\ &= 0,65 L_2 + 2,16 d L_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_A &= (0,5 \delta_A d + s_n) K_A d \\
 &= [(0,5 \times 17,6 d + (0,3 \times 17,6))] \tan^2 (45-35/2) d \\
 &= 2,38 d^2 + 1,43 d
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_P &= (0,5 \delta_A d + s_n) K_P d \\
 &= [(0,5 \times 17,6 \times d) + (0,3 \times 17,6)] \tan^2 (45 + 35/2) d \\
 &= 32,47 d^2 + 19,48 d
 \end{aligned}$$

Si on suppose

$$\begin{aligned}
 L_1 &= 0,6 \text{ m} \\
 L_2 &= 0,8 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Alors

$$d = 0,14 \text{ m} < 0.3 \text{ m}$$

Voir détail (tranchée d'ancrage PEHD 1er niveau)

### 3.2 Géotextile de protection

\* en considérant la présence de la géomembrane sur tout  $L_1$

$$T = F_{us1} + F_{ls1} + F_{LT1} + F_{us2} + \dots$$

$$\begin{aligned}
 F_{us1} &= (0,3 \times 17,6) \tan (25) L_1 \\
 &= 2,46 L_1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{ls1} &= (0,3 \times 17,6) \tan (10) L_1 \\
 &= 0,93 L_1
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{LT1} &= 22,47 \sin (16,7) \tan (10) \\
 &= 1,14
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{LT2} &= 22,47 \sin (16,7) \tan (25) \\
 &= 3,01
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_{ls2} = F_{us2} &= (0,9 \times 17,6) \tan (25) L_2 \\
 &= 7,39 L_2
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_A &= (0,5 \times 17,6 d + 0,3 \times 17,6) \tan^2 (45-35/2) d \\
 &= 2,38 d^2 + 1,43 d
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_P &= (0,5 \times 17,6 d + 0,3 \times 17,6) \tan^2 (45+35/2) d \\
 &= 32,47 d^2 + 19,48 d
 \end{aligned}$$

On obtient

$$T_{adm} = 22,47 = 3,39L_1 + 14,78 L_2 + 30,09 d^2 + 18,05d + 4,15$$

Pour  $L_1 = 1,9$  m  
 $L_2 = 0,5$  m

On obtient  $d = 0,18$  m  
Choix de la profondeur d'ancrage =  $0,6$  m  
 $d < 0,6$  = profondeur suffisante