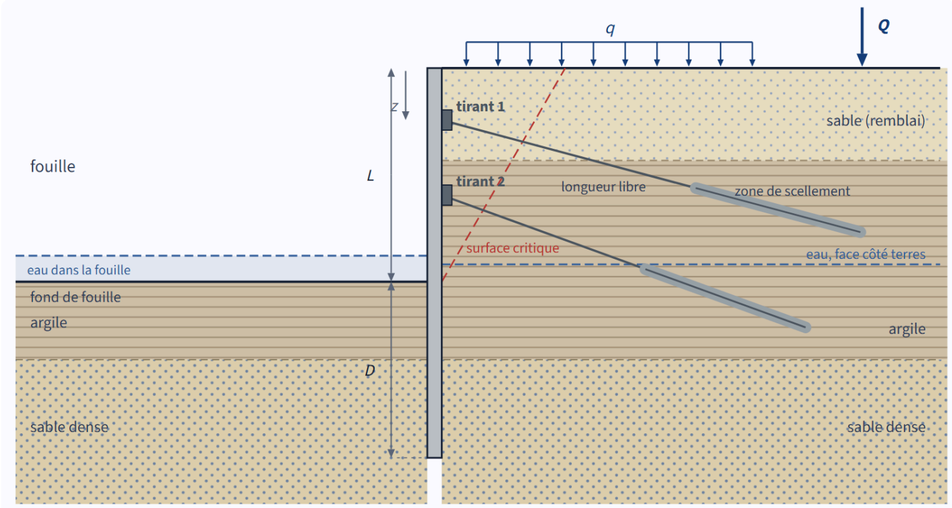
Présentation de cours de géotechnique · Rideaux de palplanches et fouilles étayées

Rideau de palplanches ancré (sol stratifié)

Cours : rideau de palplanches autostable et ancré dans un sol stratifié de sable et d'argile ; contraintes sur les deux faces, court et long terme, fiche, efforts dans les tirants, moment, section, séisme ; exemple de calcul pour chaque sujet.



Sol stratifié · Court terme et long terme · Butée simple · rotule · Ancrage · EN 1993 · AISC 360 · Séisme · soulèvement du fond

Basé sur la page de théorie de GeoTerva · geoterva.com

Que verrons-nous dans ce cours ?

Dans un profil comportant jusqu'à six couches de **sable (drainé : c′, φ′) et d'argile (court terme c_u, long terme c′, φ′)**, les contraintes et les pressions sur les deux faces du mur

Dans l'argile non drainée : $\sigma_v \mp 2c_u$, la **fissure de traction** (remplie d'eau) et les scénarios à **court/long terme**, la règle « la plus grande valeur de chaque résultat »

Le **diagramme de pression nette** et la marge de sécurité (f sur la fiche, FS_p sur la butée, fiche donnée)

La statique du rideau **autostable**, du rideau à **un lit de tirants (méthode de la butée simple)** et du rideau à **plusieurs lits de tirants (méthode des rotules)** ; moment, effort dans le tirant et adhérence du scellement

Vérifier le rideau de palplanches selon **EN 1993-1-1 / AISC 360-22** ; les vérifications au **séisme**, au **soulèvement du fond de fouille** et au **déplacement**

DÉROULÉ DU COURS

Chaque thème est traité en **trois étapes** :

1 · **Théorie** : quelle est la règle, pourquoi en est-il ainsi ?

2 · **Énoncé** : données et à déterminer

3 · **Solution** : étape par étape, avec les valeurs numériques

Mur d'exemple : fouille de 7.5 m de hauteur ; 3 m de sable en haut, 6 m d'argile, sable compact en dessous ; eau à 8.5 m de profondeur de part et d'autre ; surcharge q = 10 kPa ; deux lits de tirants (1.5 m et 4.5 m, s = 2.5 m, 15° et 20°). Les efforts sont donnés par mètre de mur.

Comment le mur est-il maintenu ?

THÉORIE

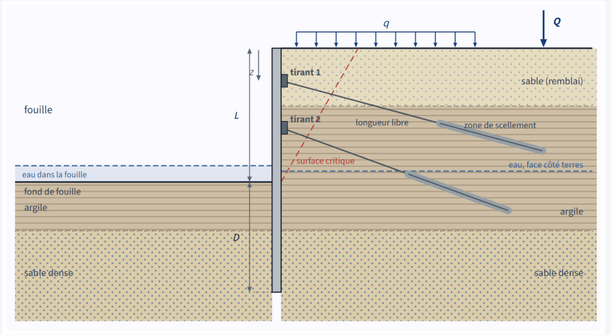
Le rideau de palplanches tient par sa fiche sous le fond de fouille et, lorsque la hauteur retenue est trop grande pour cela, par des **tirants d'ancrage**. Le terrain réel est rarement une couche unique : le sable pousse et résiste par frottement, l'argile par sa résistance ; la résistance de l'argile n'est pas la même juste après l'excavation que des années plus tard. Le module prend le profil tel quel : **jusqu'à six couches**, se prolongeant sous le fond de fouille sur les deux faces.

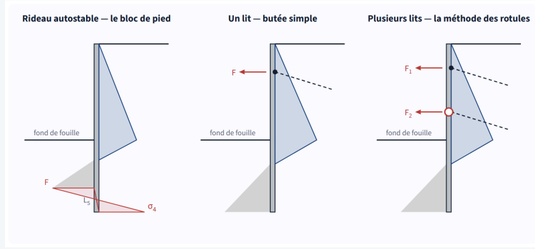
Rideau autostable : il n'est maintenu que par le sol ; il tourne autour d'un point proche du pied (poussée au-dessus du fond de fouille ; en dessous, les côtés s'inversent). La hauteur soutenue reste économique jusqu'à environ 5–6 m.

Un seul lit d'ancrages : le rideau est une poutre sur deux appuis (l'ancrage et la butée de la fiche) ; le pied est supposé libre : **méthode de la butée simple**, la fiche se déduit d'une seule équation de moments par rapport à l'ancrage.

Ancrage à plusieurs lits : le mur est hyperstatique ; la **méthode des rotules** place une rotule à chaque ancrage sauf le plus haut, les portées deviennent des poutres simplement appuyées, et la partie sous l'ancrage le plus bas est dimensionnée avec une butée simple.

z est mesuré vers le bas à partir du sommet du mur ; L est la profondeur du fond de fouille et D la fiche. La pression nette est positive vers la fouille ; le tirant retient le mur avec F (par mètre linéaire). La méthode est **l'équilibre limite** : le sol est pris dans ses états limites de poussée et de butée.





σ_v, u, σ'_v ; Rankine c′–φ′

THÉORIE

Sur chaque face, trois champs de contraintes sont tenus : la contrainte verticale totale σ_v, la pression interstitielle u et la contrainte effective $\sigma'_v = \sigma_v - u$. L'argile non drainée est définie par le premier, la couche drainée par le deuxième et le troisième. La colonne retenue conserve toutes ses terres sus-jacentes également sous le fond de fouille ; la colonne excavée repart au fond de fouille : c'est cette différence que la fiche doit équilibrer.

$$\sigma_{v,b}(z) = q + \sum \gamma_i \Delta z_i \quad u_b = \gamma_w \max(0, z - D_w) \quad \sigma'_{v,b} = \sigma_{v,b} - u_b$$

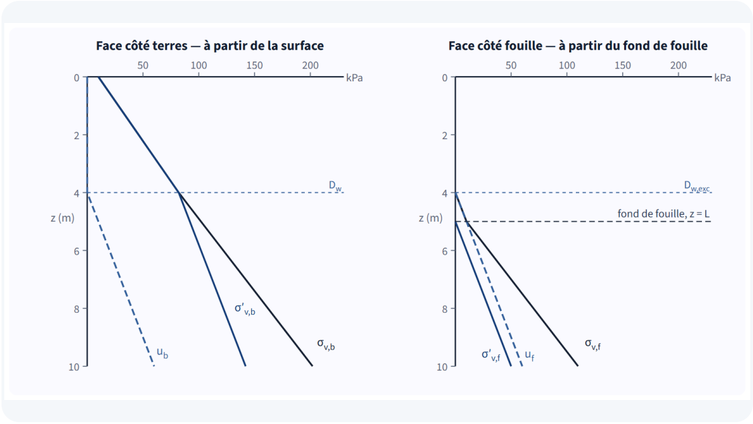
Couche drainée (sable, ou argile à long terme) : Rankine, mur vertical, surface plane, sans frottement sol-écran :

$$K_a = \tan^2\left(45^\circ - \tfrac{\varphi'}{2}\right) \quad K_p = \tan^2\left(45^\circ + \tfrac{\varphi'}{2}\right) \quad p_a = \max\left(0,\ K_a\sigma'_v - 2c'\sqrt{K_a}\right) + u \quad p_p = \eta_p\left(K_p\sigma'_v + 2c'\sqrt{K_p}\right) + u$$

Chaque couche possède ses propres valeurs de K_a, K_p : σ'_v est continue mais **la pression présente un saut à la limite de couche** ; ces sauts sont une caractéristique réelle du diagramme et ne sont pas lissés.

Pour c′ > 0, l'expression de la poussée devient négative au-dessus de la couche : le sol ne peut pas tirer le mur, la partie due au sol est donc **coupée** à zéro (la partie due à l'eau n'est pas coupée).

La surcharge uniforme q s'ajoute à $\sigma_{v,b}$ à toute profondeur ; la coupure en traction en tient compte.



Énoncé

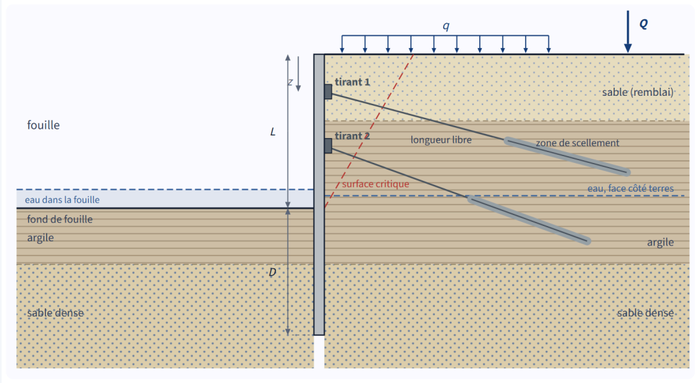
EXEMPLE

Données

Profil	**en haut 3.0 m de sable ($\gamma = 18$, $\varphi' = 30°$), 6.0 m d'argile ($\gamma = 19$, $c' = 5$ kPa, $\varphi' = 24°$, $c_u = 45$ kPa), au-dessous du sable dense ($\gamma = 19$, $\varphi' = 36°$) ; $L = 7.5$ m ; eau à 8.5 m des deux côtés ; $q = 10$ kPa**
Énoncé	**côté retenu $z = 3.0$ m (limite sable–argile) et fond de fouille $z = L = 7.5$ m**

À DÉTERMINER

σ'_v ; $\mathbf{p_a}$ pour le sable et pour l'argile (drainée, long terme) ; saut à la limite sable–argile.



Solution

SOLUTION

1 À la limite sable–argile (z = 3.0 m ; eau à 8.5 m, u = 0)

$$\sigma'_v(3.0) = q + \gamma z = 10 + 18(3.0) = 64.0\ \text{kPa}$$

$$\text{sable : } p_a = K_a \sigma'_v = 0.3333(64.0) = \mathbf{21.33}\ \text{kPa}$$

$$\text{argile } (\varphi' = 24^\circ)\text{: } p_a = K_a \sigma'_v - 2c'\sqrt{K_a} = 0.4217(64.0) - 2(5)\sqrt{0.4217} = \mathbf{20.50}\ \text{kPa}$$

2 Au fond de fouille (z = L = 7.5 m) : la colonne retenue a progressé de 4.5 m supplémentaires dans l'argile

$$\sigma'_v(L) = 64.0 + 19(4.5) = 149.5\ \text{kPa}$$

$$p_a = 0.4217(149.5) - 2(5)\sqrt{0.4217} = \mathbf{56.55}\ \text{kPa}$$

σ′$_v$ est continue (64 kPa), mais la pression subit à l'interface un saut **21.33 → 20.50 kPa** (sable K_a = 1/3, argile K_a = 0.4217 et contribution de c′ de −6.49 kPa). Au fond de fouille, la poussée active vaut 56.55 kPa.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

$\sigma_v \mp 2c_u$; « la plus grande de chaque résultat »

THÉORIE

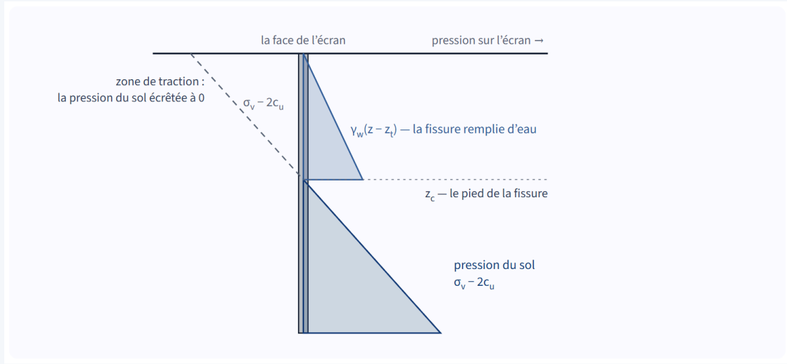
Une argile saturée chargée rapidement (la fouille est réalisée devant elle) ne peut pas drainer : la résistance est c_u, $\varphi = 0$, définie en **contraintes totales** (l'eau est comprise dans σ_v) :

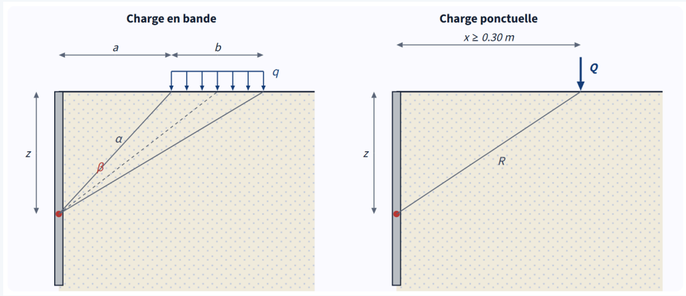
$$p_a = \max(\sigma_v - 2c_u,\ u) \qquad p_p = \eta_p(\sigma_v + 2c_u) \qquad p_{crack} = \gamma_w(z - z_t)\ \ (z_t \le z \le z_c)$$

Au-dessus de l'argile retenue, $\sigma_v - 2c_u$ est négatif : l'argile se fissure ; z_t est le sommet de la zone tendue et $\mathbf{z_c}$ son extrémité inférieure, où $\sigma_v = 2c_u$. Une fissure ouverte en surface se remplit de pluie ou d'eau souterraine et pousse par sa propre pression hydrostatique : **par défaut, remplie d'eau** (côté sécurité) ; elle peut être déclarée sèche (avec un avertissement), et le résultat de l'autre cas est toujours indiqué.

Court terme : argile non drainée ; **long terme** : chaque couche drainée. On ne sait pas à l'avance lequel est défavorable ; le module **calcule les deux** et retient pour la fiche, l'effort dans chaque tirant et le moment **la plus grande valeur des deux scénarios** (elles ne proviennent pas nécessairement du même scénario). Un scénario dans lequel le tirant ne reprend aucune traction ne gouverne pas le mur ; il est noté.

Surcharge : la charge uniforme q s'ajoute à $\sigma_{v,b}$; la charge en bande (a, b, q) et la charge ponctuelle (Q, x) relèvent de la solution élastique pour un mur rigide et ne sont **pas multipliées** par K_a ; en cas de séisme, elle intervient avec ψ_2.





Énoncé

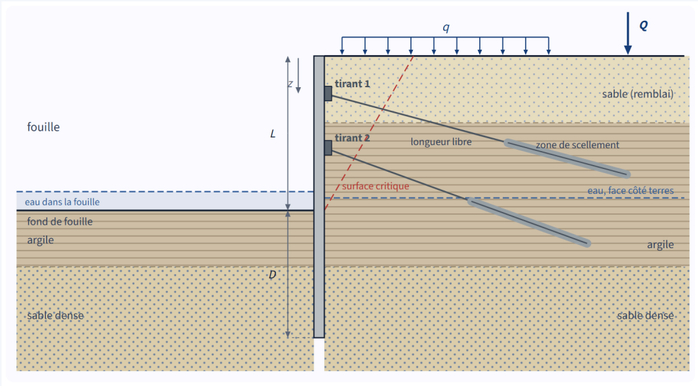
EXEMPLE

Données

Profil	**en haut 3.0 m de sable ($\gamma = 18$, $\varphi' = 30°$), 6.0 m d'argile ($\gamma = 19$, $c' = 5$ kPa, $\varphi' = 24°$, $c_u = 45$ kPa), au-dessous du sable dense ($\gamma = 19$, $\varphi' = 36°$) ; $L = 7.5$ m ; eau à 8.5 m des deux côtés ; $q = 10$ kPa**
Énoncé	**à court terme, $\sigma_v - 2c_u$ au-dessus de l'argile et z_c à l'extrémité inférieure de la fissure ; résultats des deux scénarios**

À DÉTERMINER

$\sigma_v - 2c_u$ (au-dessus de l'argile), **z_c** et la pression de l'eau dans la fissure ; les valeurs de D, F, M à court et à long terme et laquelle est déterminante.



Solution

SOLUTION

1 Court terme : au-dessus de l'argile (z = 3.0 m, σ_v = 64.0 kPa, c_u = 45 kPa)

$$\sigma_v - 2c_u = 64.0 - 2(45) = -\mathbf{26.0}\ \text{kPa} < 0 \Rightarrow \text{est coupé ; la fissure s'ouvre}$$

$$\sigma_v(z_c) = 2c_u : \quad 64.0 + 19(z_c - 3) = 90 \Rightarrow z_c = \mathbf{4.37}\ \text{m}$$

$$p_{crack}(z_c) = \gamma_w(z_c - z_t) = 9.81(1.37) = 13.4\ \text{kPa}$$

2 Les deux scénarios sont calculés (moteur du module) ; le mur est dimensionné pour le plus grand des deux

Scénario	$D_{théorique}$ (m)	D_{req} (f = 1.3)	F_1, F_2 (kN/m)	M_{max} (kN·m/m)	z_M (m)
Court terme (argile non drainée)	1.549	2.014	34.30 ; 56.94	59.49	6.55
Long terme (tout drainé)	2.403	3.124	41.69 ; 132.32	121.43	6.82

La fissure remplie d'eau engendre une pression hydrostatique sur **1.37 m** au-dessus de l'argile (3.0 → 4.37 m). Le long terme est **déterminant dans tous les résultats** (D, F_1, F_2, M) : le mur est dimensionné pour le scénario à long terme ; le moment à court terme est inférieur à la moitié.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

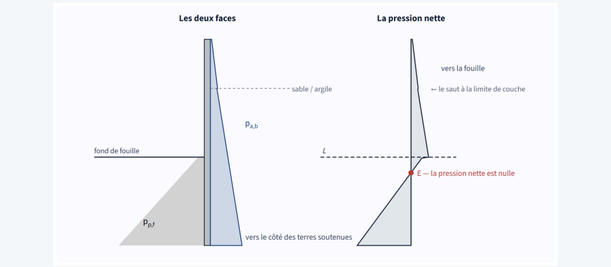
Diagramme des différences ; f en fonction de la profondeur ou FS_p pour la butée

THÉORIE

Le mur ressent la **différence** entre les deux faces : $p_{net} = p_b - p_f$ (retenu – fouille). L'équilibre est écrit sur ce diagramme : au-dessus du fond de fouille, la poussée active et l'eau du sol retenu ; en dessous, la butée de la fiche croît plus vite que la poussée et la pression nette s'annule au point E puis s'inverse vers le côté retenu. Le sommet, les tirants, le fond de fouille, chaque limite de couche, les niveaux d'eau, les extrémités des fissures, les bords des charges et les zéros des pressions tronquées divisent le mur en **tronçons** ; dans chaque tronçon, la composante est linéaire, et l'effort et le moment sont intégrés exactement :

$$F_{seg} = \tfrac{1}{2}(p_0 + p_1)h \qquad M_{seg}(z_r) = \frac{h\,[p_0(2z_0 + z_1) + p_1(z_0 + 2z_1)]}{6} - z_r F_{seg}$$

Aucune marge n'est prise dans la profondeur théorique $D_{théorique}$; deux approches (figure) :



Coefficient f appliqué à la fiche : $D_{nec} = f \cdot D_{th}$ (f = 1.2–1.3 sable, 1.4–1.6 argile) ; les pressions et le moment sont ceux du rideau théorique.

FS_p sur la butée : $\eta_p = 1/FS_p$ multiplie la pression passive **du sol** (jamais la pression de l'eau) ; la profondeur du diagramme réduit devient D_{req}. La valeur D_{req} de l'autre voie est toujours indiquée à côté.

Fiche donnée : vérifiée par $UR_D = D_{req}/D_{don} \leq 1$; on détermine $FS_{p,mob}$, coefficient par lequel la butée peut être divisée. Les moments et les efforts d'ancrage sont pris selon **la plus grande valeur** des cas de calcul et de fiche donnée.

Énoncé

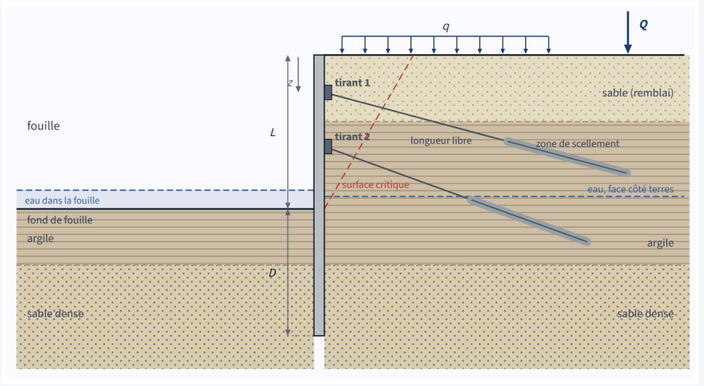
EXEMPLE

Données

Mur	**en haut 3.0 m de sable ($\gamma = 18$, $\varphi' = 30°$), 6.0 m d'argile ($\gamma = 19$, $c' = 5$ kPa, $\varphi' = 24°$, $c_u = 45$ kPa), en dessous du sable dense ($\gamma = 19$, $\varphi' = 36°$) ; $L = 7.5$ m ; eau à 8.5 m sur les deux faces ; $q = 10$ kPa ; deux lits de tirants : $z = 1.5$ m ($15°$) et 4.5 m ($20°$), $s = 2.5$ m ; $f = 1.3$; S275, $W_{el} = 1\,400$ cm³/m**
Routes	$f = 1.3$; $FS_p = 1.5$; données $D = 3.5$ m et 6.0 m

À DÉTERMINER

Pour chaque cheminement, $\mathbf{D_{req}}$, $\mathbf{M_{max}}$, $\mathbf{T_2}$ et $FS_{bond,2}$; à la profondeur donnée, UR_D, $FS_{p,mob}$.



Solution

SOLUTION

1 Application de f à la fiche : $D_{req} = 1.3 \times D_{th} = 1.3 \times 2.403 = 3.124$ m (moments et efforts correspondant au rideau théorique)

Route	$D_{requise}$ / donnée (m)	UR_D	$FS_{p,mob}$	M_{max} (kN·m/m)	T_2 (kN)	$FS_{bond,2}$
f = 1.3 (excavation)	3.124	—	—	121.4	352.0	2.14
FS_p = 1.5 (butée / 1.5)	3.273	—	—	153.3	386.6	**1.95**
Donnée D = 3.5 m	3.500	0.893	1.63	161.6	395.1	**1.91**
Donnée D = 6.0 m	6.000	0.521	2.94	255.5	480.4	**1.57**

Avec la butée affectée de $FS_p = 1.5$, on obtient un mur plus profond (3.27 m) et un **moment plus grand** (153.3). **Lorsque la fiche donnée dépasse la fiche requise, le moment et l'effort dans le tirant augmentent** : pour D = 6.0 m, M = 255.5 kN·m/m (2.1 fois la valeur initiale) et $T_2 = 480$ kN, $FS_{bond,2} = 1.57 < 2$: le scellement est insuffisant. Allonger le mur au-delà du nécessaire n'apporte pas de sécurité.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Bloc de pied ; butée simple

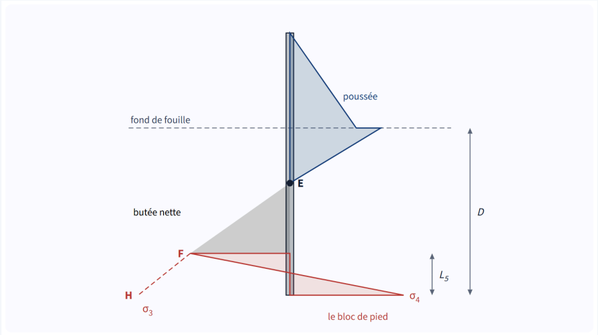
THÉORIE

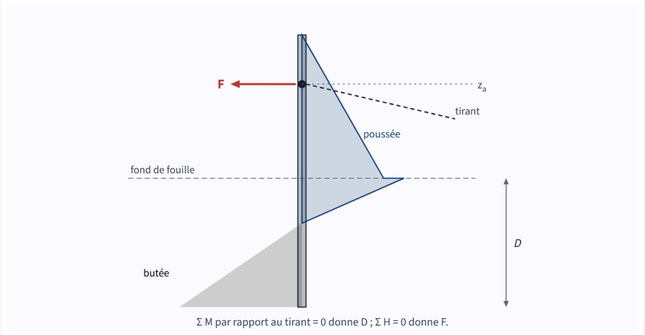
Rideau autostable : sous le fond de fouille, la droite des pressions nettes va de E à F, puis de F jusqu'au bloc de pied (L_5) où l'ordonnée σ_4 est inversée : ΣH = 0 et ΣM = 0 par rapport au pied. Dans un sable unique, on se ramène à une équation du quatrième degré en L_4 ; dans un profil stratifié, elle est résolue numériquement sur le même diagramme. Le bloc doit se situer sous E ($0 < L_5 < L_4$).

Un seul niveau d'ancrage : le pied est supposé libre, avec translation ; la fiche se déduit du **moment par rapport à l'ancrage**, l'effort dans l'ancrage de l'équilibre horizontal :

$$\int_0^{L+D} p_{net}(z)(z - z_a)\,dz = 0 \qquad F = \int_0^{L+D} p_{net}(z)\,dz$$

La méthode de la butée simple donne **le rideau le plus court et le moment le plus grand des méthodes classiques** ; la réduction de moment de Rowe pour un rideau souple n'est pas appliquée.





Méthode des rotules ; effort tranchant et moment

THÉORIE

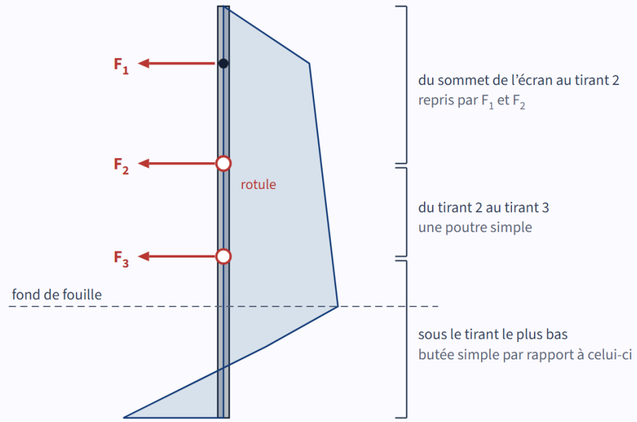
Avec trois appuis ou plus, le mur est une poutre continue, hyperstatique. La **méthode des rotules** la rend isostatique en plaçant une rotule (moment nul) à chaque ancrage sauf le plus haut : la travée supérieure est une poutre sur les deux premiers ancrages, les travées intermédiaires sont des poutres simplement appuyées, et sous l'ancrage le plus bas, le sol constitue, par rapport à cet ancrage, un appui libre (butée simple).

$$\int_{z_n}^{L+D} p_{net}(z)(z - z_n)\, dz = 0$$

L'effort dans une file est la somme des réactions des travées situées de part et d'autre ; la file inférieure reprend aussi l'effort horizontal du tronçon situé en dessous. Le moment est nul à chaque rotule (le module le vérifie comme fermeture) ; une file qui reste en compression est signalée par un avertissement.

$$V(z) = \int_0^z p_{net} dz - \sum_{z_a < z} F_i \qquad M(z) = \int_0^z V\, dz$$

V et M sont intégrés sur les éléments ; le **moment maximal se trouve là où V = 0** (à l'intérieur d'un élément) et n'est pas choisi parmi les nœuds.



Énoncé

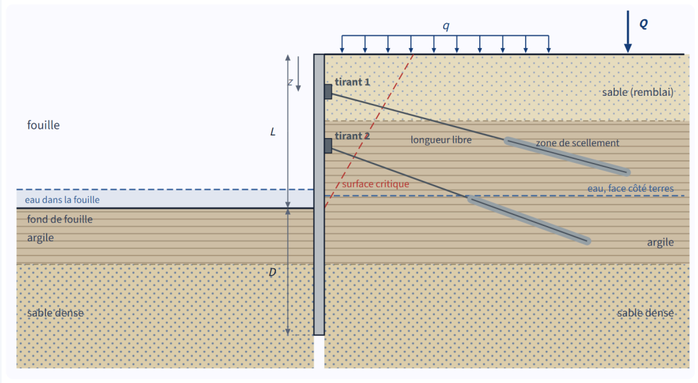
EXEMPLE

Données

Profil et charges	**en haut 3.0 m de sable ($\gamma = 18$, $\varphi' = 30°$), 6.0 m d'argile ($\gamma = 19$, $c' = 5$ kPa, $\varphi' = 24°$, $c_u = 45$ kPa), au-dessous du sable dense ($\gamma = 19$, $\varphi' = 36°$) ; $L = 7.5$ m ; eau à 8.5 m des deux côtés ; $q = 10$ kPa**
Systèmes	**(a) rideau autostable sans ancrage ; (b) un lit ($z = 1.5$ m, $15°$) ; (c) deux lits (cas d'ouverture) ; dans tous les cas $f = 1.3$, S275 $W_{el} = 1\,400$ cm³/m**

À DÉTERMINER

D_{th}, **D_{req}**, **M_{max}**, effort dans le tirant et **η** du rideau de palplanches pour chaque système ; lequel convient ?



Solution

SOLUTION

1 Même profil, trois systèmes (le moteur du module ; partout le plus grand des deux scénarios)

Système	Méthode	$D_{théorique}$ (m)	D_{req} (m)	M_{max} (kN·m/m)	Ancrage (kN/m)	η (EN 1993)
(a) Autostable	bloc de pointe	8.033	10.443	1,210.1	—	**4.243**
(b) Rangée unique	butée simple	2.896	3.765	295.9	128.2	**1.037**
(c) Deux rangées	rotule	2.403	3.124	121.4	41.7 ; 132.3	0.426

Pour une hauteur retenue de 7.5 m, le **rideau autostable** exige 10.4 m de fiche et 1,210 kN·m/m : le rideau de palplanches est insuffisant (η = 4.24). **Un seul lit** ramène la fiche à 3.76 m, mais conserve η = 1.037 > 1 avec M = 296 kN·m/m. **Deux lits** abaissent le moment à 121.4 kN·m/m et le rideau est suffisant (η = 0.426) : le nombre de lits détermine le moment et la fiche.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Énoncé

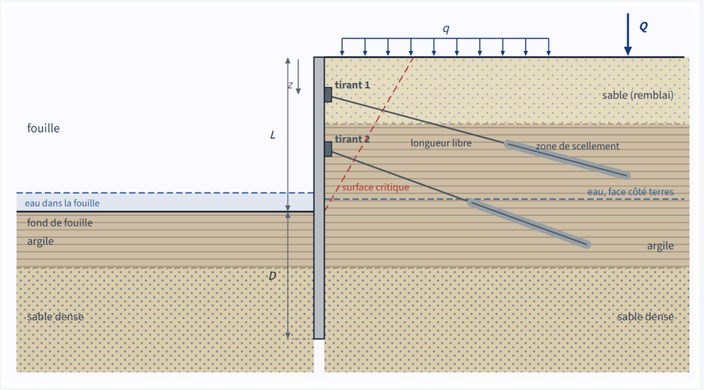
EXEMPLE

Données

Mur	**en haut 3.0 m de sable ($\gamma = 18$, $\varphi' = 30°$), 6.0 m d'argile ($\gamma = 19$, $c' = 5$ kPa, $\varphi' = 24°$, $c_u = 45$ kPa), en dessous du sable dense ($\gamma = 19$, $\varphi' = 36°$) ; $L = 7.5$ m ; eau à 8.5 m sur les deux faces ; $q = 10$ kPa ; deux lits de tirants : $z = 1.5$ m ($15°$) et 4.5 m ($20°$), $s = 2.5$ m ; $f = 1.3$; S275, $W_{el} = 1\,400$ cm³/m**
Type de résultat	**scénario à long terme (déterminant) ; rotule à $z = 4.5$ m**

À DÉTERMINER

Efforts dans les ancrages **F_1**, **F_2** et leur somme ; fermeture ; **M_{max}** et sa position ; points où V = 0.



Solution (1/2)

SOLUTION

1 Lits de tirants (par mètre) et équilibre horizontal

$$F_1 = 41.69\ \text{kN/m}\ \ (z = 1.5\ \text{m}) \qquad F_2 = 132.32\ \text{kN/m}\ \ (z = 4.5\ \text{m})$$

$$F_1 + F_2 = 41.69 + 132.32 = 174.00\ \text{kN/m} = \Sigma H_{net}\ \ (\text{force horizontale totale})$$

2 Le moment est nul à la rotule ; le moment maximal là où V = 0

$$M(z = 4.5) = 0 \approx 0\ \checkmark\ \ (\text{fermeture})$$

$$V = 0 :\quad z = 3.22\ \text{m}\ \ \text{et}\ \ z_M = 6.82\ \text{m} \qquad M_{max} = \mathbf{121.43}\ \text{kN·m/m}$$

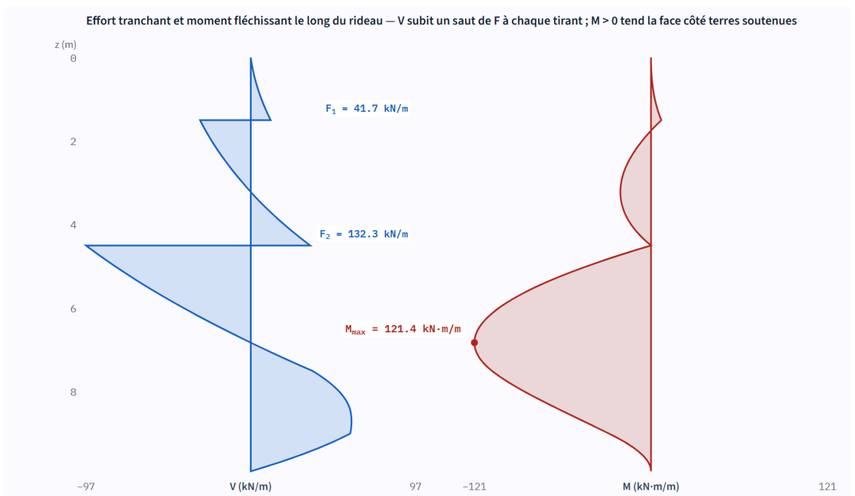
Les efforts dans les tirants sont **F_1 = 41.69** et **F_2 = 132.32 kN/m** ; leur somme est la résultante horizontale du diagramme net (pied libre). **M_{max} = 121.43 kN·m/m**, sous le fond de fouille à z = 6.82 m (V = 0).

Solution (2/2)

SOLUTION

3 Diagramme de l'effort tranchant et du moment fléchissant (V subit un saut de F à chaque ancrage)
$V(z) = \int p_{net} dz - \Sigma F_i$; $M(z) = \int V\, dz$. Le moment maximal vaut 121.4 kN·m/m à la profondeur de 6.82 m ; les deux points où V = 0 (3.22 m et 6.82 m) sont des maxima locaux du moment.

Les vérifications de fermeture sont satisfaites : moment à la rotule ≈ 0, effort tranchant et moment nuls à l'extrémité, résultante du tronçon identique à celle de l'intégrale fine (174.0 kN/m). Le diagramme des moments présente un pic local dans la partie en console supérieure et son pic maximal sous le fond de fouille.



Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Force, longueur libre, scellement et effort de blocage

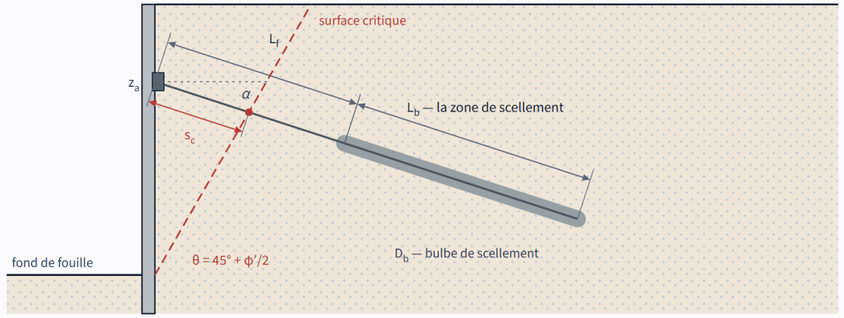
THÉORIE

La réaction F d'un lit est rapportée au mètre de mur. Les tirants d'ancrage sont espacés de s et inclinés de α par rapport à l'horizontale :

$$T = \frac{F\,s}{\cos\alpha} \qquad T_v = T\sin\alpha$$

La zone d'injection (scellement) doit rester **derrière** le coin qui se déplace avec le mur. La surface critique part de l'angle de la fouille et s'élève selon θ = 45° + φ′/2 ; elle recoupe le tirant à la distance suivante :

$$s_c = \frac{L - z_a}{\cos\alpha\tan\theta + \sin\alpha} \qquad L_f \geq s_c + \max(1.5\ \text{m},\ L/5)$$



La surface est déterminée automatiquement lorsqu'un seul sable constitue toute la hauteur retenue ; dans un profil stratifié ou argileux, un plan unique n'est pas une construction fiable : la surface est saisie à partir d'une analyse distincte, sinon la vérification est signalée « non effectuée ».

Adhérence : $T_{ult} = \pi\, D_b\, L_b\, \tau_{ult}$; $FS_{bond} = T_{ult}/\max(T, P_0) \geq FS_{req}$. Le tirant est bloqué à P_0 et le scellement porte cette charge dès l'origine : la sollicitation est la plus grande des valeurs T et P_0. $P_0/T_{ult} \leq 1$ est en outre contrôlé séparément comme vérification des données d'entrée.

Énoncé

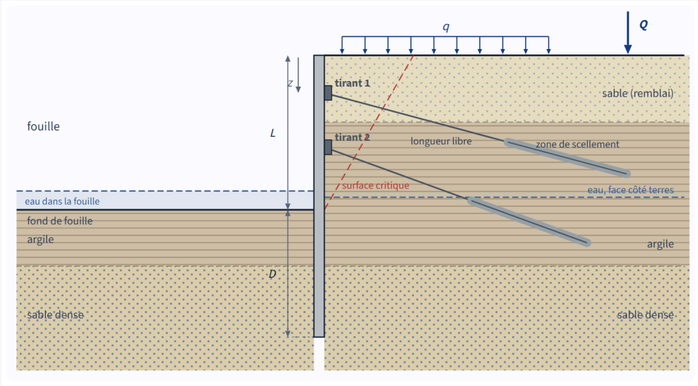
EXEMPLE

Données

Ancrages	**ligne 1 :** $z = 1.5$ **m,** $s = 2.5$ **m,** $\alpha = 15°$, $F_1 = 41.69$ **kN/m ; ligne 2 :** $z = 4.5$ **m,** $\alpha = 20°$, $F_2 = 132.32$ **kN/m**
Attache	$D_b = 0.20$ **m,** $L_b = 8$ **m,** $\tau_{ult} = 150$ **kPa ;** **effort de blocage** $P_0 = 250$ **kN ;** $FS_{bond,required} = 2.0$

À DÉTERMINER

Pour chaque ancrage : **T**, T_V ; $\mathbf{T_{ult}}$, $\mathbf{FS_{bond}}$ et P_0/T_{ult}.



Solution (1/2)

SOLUTION

1 Efforts dans les ancrages (chacun selon l'axe du tirant)

$$T_1 = \frac{F_1 s}{\cos 15^\circ} = \frac{41.69(2.5)}{0.9659} = \mathbf{107.9}\ \text{kN}$$

$$T_2 = \frac{F_2 s}{\cos 20^\circ} = \frac{132.32(2.5)}{0.9397} = \mathbf{352.0}\ \text{kN}$$

Les efforts dans les tirants sont dirigés selon l'axe du tendon ; les composantes verticales $T_{v,1}$ = 27.9 et $T_{v,2}$ = 120.4 kN sont indiquées (elles ne sont pas reportées dans la vérification du rideau de palplanches).

Solution (2/2)

SOLUTION

2 Scellement : $T_{ult} = \pi D_b L_b \tau_{ult} = \pi(0.20)(8)(150) = 754.0$ kN

$$FS_{bond,1} = \frac{T_{ult}}{\max(T_1, P_0)} = \frac{754.0}{\max(107.9, 250)} = \mathbf{3.016} \geq 2 \checkmark$$

$$FS_{bond,2} = \frac{754.0}{\max(352.0, 250)} = \mathbf{2.142} \geq 2 \checkmark$$

Au premier ancrage, le tirant est déterminé par l'**effort de blocage** ($P_0 > T_1$), au second par l'**effort de service** (FS 3.02 et 2.14) ; $P_0/T_{ult} = 0.332 \leq 1$.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

EN 1993-1-1 ou AISC 360-22

THÉORIE

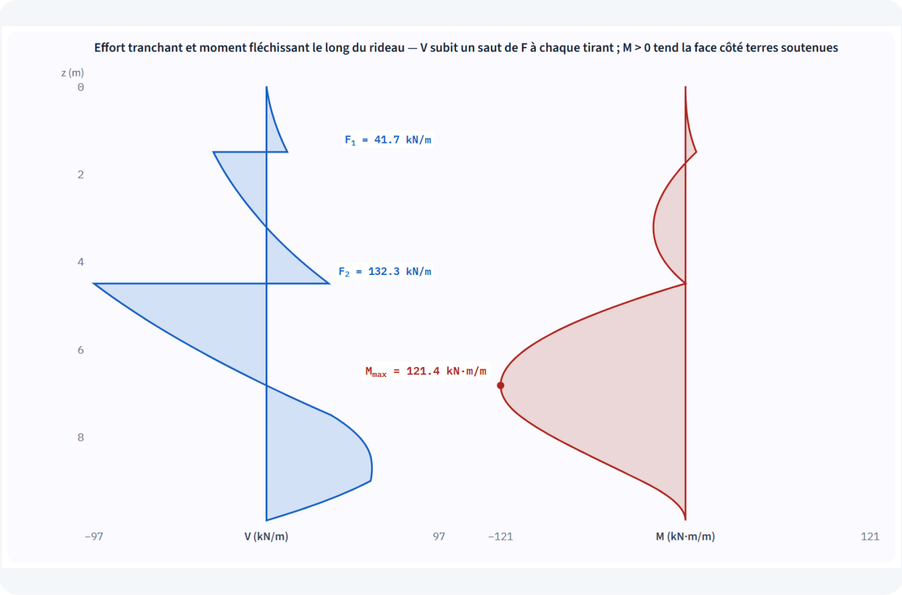
La section d'acier est vérifiée en flexion sous le moment de calcul maximal. On utilise le module de résistance W par mètre de mur (d'après les tableaux de palplanches ; élastique ou plastique, selon la classe) ; la valeur requise W_{req} est toujours indiquée afin que la section puisse être choisie dans le catalogue :

$$M_{Ed} = \gamma_F M_{max} \leq M_{c,Rd} = \frac{W f_y}{\gamma_{M0}} \qquad W_{req} = \frac{M_{Ed}\gamma_{M0}}{f_y}$$

$$\text{LRFD: } \gamma_H M_{max} \leq \phi_b M_n \ (\phi_b = 0.90) \qquad \text{ASD: } M_{max} \leq \frac{M_n}{\Omega_b} \ (\Omega_b = 1.67)$$

EN 1993-1-1 : γ_F = 1.35, γ_{M0} = 1.00. AISC : γ_H = 1.6 (poussée latérale des terres H), $M_n = F_y Z$ (section compacte) ou $F_y S$ (première plastification).

L'effort tranchant dans le mur, le flambement local de ses éléments et la perte par corrosion ne font pas partie de la vérification et sont indiqués dans le rapport. Les efforts dans les tirants et le moment sont pris égaux à la plus grande des valeurs du cas de dimensionnement et du cas de fiche donnée.



Énoncé

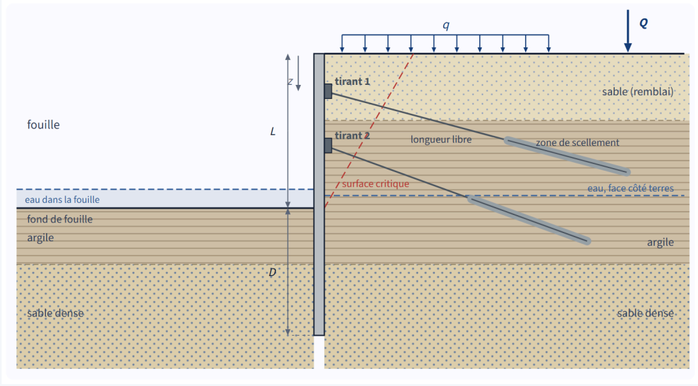
EXEMPLE

Données

Moment	**Exemple 5 :** $M_{max} = 121.43$ **kN·m/m**
Coupe	**S275 (**$f_y = 275$ **MPa),** $W_{el} = 1\,400$ **cm³/m ; EN :** $\gamma_F = 1.35$**,** $\gamma_{M0} = 1.0$ **; AISC :** $\gamma_H = 1.6$ **,** $\Omega_b = 1.67$ **(**$M_n = F_y S$**)**

À DÉTERMINER

M_{Ed}, **W_{req}**, $M_{c,Rd}$, **η** (EN) ; η pour LRFD et ASD.



Solution

SOLUTION

1 EN 1993-1-1

$$M_{Ed} = 1.35(121.43) = \mathbf{163.92}\ \text{kN·m/m} \qquad W_{req} = \frac{M_{Ed}\gamma_{M0}}{f_y} = \frac{163.92}{275\,000} = \mathbf{596}\ \text{cm}^3\text{/m}$$

$$M_{c,Rd} = 1\,400 \cdot 10^{-6}(275\,000) = 385.0\ \text{kN·m/m} \qquad \eta = \frac{163.92}{385.0} = \mathbf{0.426} \le 1\ \checkmark$$

2 AISC 360-22 ($M_n = F_yS$ = 385.0 kN·m/m)

$$\text{LRFD: } 1.6(121.43) = 194.28 \le 0.90(385.0) = 346.5 \quad \eta = \mathbf{0.561}$$

$$\text{ASD: } 121.43 \le \frac{385.0}{1.67} = 230.5 \quad \eta = \mathbf{0.527}$$

Le rideau de palplanches est suffisant : EN 1993-1-1 η = **0.426** (W requis = 596 cm³/m < 1 400), AISC LRFD **0.561**, ASD **0.527**.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Pseudo-statique multicouche : Mononobe–Okabe dans le sable, coin non drainé dans l'argile

THÉORIE

Chaque coefficient statique est remplacé par son équivalent pseudo-statique propre à sa couche. L'angle sismique découle des coefficients horizontal et vertical :

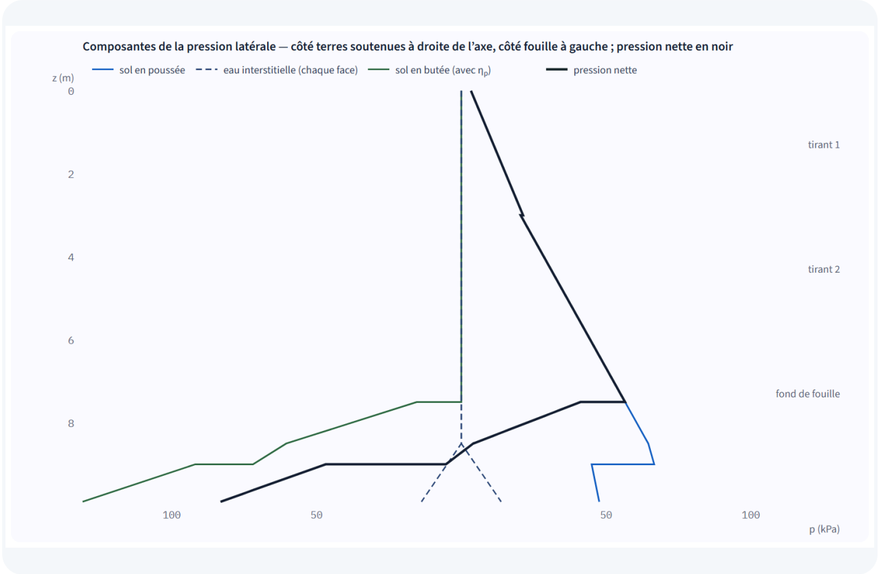
$$\tan\theta = \frac{k_h}{1 \mp k_v} \qquad \sigma_{AE} = (1 \mp k_v) K_{AE} \sigma'_v \qquad \sigma_{PE} = (1 \mp k_v) K_{PE} \sigma'_v$$

$$\text{argile :}\ \ \sigma_{AE} = (1 \mp k_v)(1 + \tan\theta)\sigma_v - 2c_u \qquad \sigma_{PE} = (1 \mp k_v)(1 - \tan\theta)\sigma_v + 2c_u$$

Les **deux scénarios** du dimensionnement statique sont eux aussi calculés avec les deux sens de k_V ; la fiche, le moment et les efforts dans les tirants les plus grands sont déterminants.

Un mur ancré ne peut pas tourner autour de son pied : l'accroissement dynamique de la poussée active est **réparti uniformément sur la hauteur retenue** : $\Delta P_{AE} = \int (p_{AE} - p_A) dz$. L'eau libre dans la fouille ajoute la pression de Westergaard ($7/8\ k_h \gamma_W \sqrt{(hz')}$).

Le séisme est une situation accidentelle : **aucun coefficient n'est appliqué** au sol en butée ; D_E, qui équilibre le diagramme sismique, ne doit pas dépasser la fiche du mur (D_d). Si le mur est plus long que D_E, chaque cas est aussi équilibré à la fiche donnée, et l'on retient le plus grand moment et le plus grand effort. Le tirant et son scellement sont également vérifiés pour T_E ($FS_{req,E} \approx 1.5$).



Énoncé

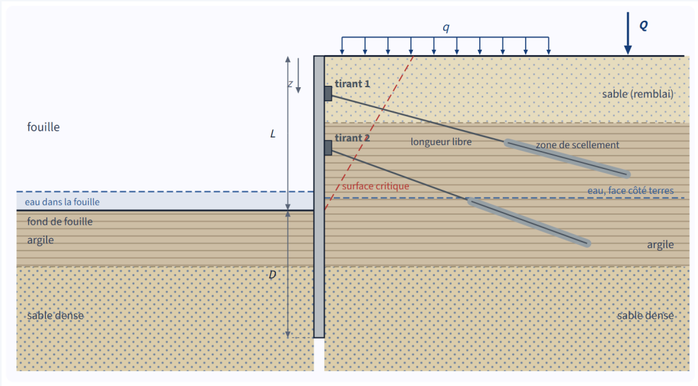
EXEMPLE

Données

Mur	**en haut 3.0 m de sable ($\gamma = 18$, $\varphi' = 30°$), 6.0 m d'argile ($\gamma = 19$, $c' = 5$ kPa, $\varphi' = 24°$, $c_u = 45$ kPa), en dessous du sable dense ($\gamma = 19$, $\varphi' = 36°$) ; $L = 7.5$ m ; eau à 8.5 m sur les deux faces ; $q = 10$ kPa ; deux lits de tirants : $z = 1.5$ m ($15°$) et 4.5 m ($20°$), $s = 2.5$ m ; $f = 1.3$; S275, $W_{el} = 1\,400$ cm³/m**
Séisme	**$k_h = 0.15$, $k_v = \pm 0.075$; eau interstitielle entraînée ; tirant : $T_{ult} = 754$ kN, requis $FS_{bond,E} \approx 1.5$**

À DÉTERMINER

Valeurs de D, M, F pour les quatre cas (deux scénarios × deux k_v) ; **D_E**, **$M_{max,E}$**, efforts dans les ancrages et scellement ; le rideau résiste-t-il à ce séisme ?



Solution (1/2)

SOLUTION

1 Quatre cas (deux scénarios du dimensionnement statique, k_V dans deux directions)

Scénario	k_V	D (m)	M (kN·m/m)	F (kN/m)	F_1 ; F_2
Court	+0.075	2.900	87.4	132.3	51.2 ; 81.0
Court	−0.075	3.110	134.9	205.0	82.4 ; 122.6
Long	+0.075	4.348	277.0	288.5	66.1 ; 222.4
Long	−0.075	3.958	277.2	315.8	81.5 ; 234.3

Fiche déterminante **D_E = 4.35 m** (long terme, k_V = +0.075) ; moment maximal **277.2 kN·m/m** (long terme, k_V = −0.075). ΔP_{AE} = 48.9 kN/m.

Solution (2/2)

SOLUTION

2 Vérifications

$$D_E = 4.35\ \text{m} \ > D_{design} = 3.12\ \text{m} \quad \text{✗} \qquad \eta_E = \frac{M_{Ed,E}}{M_{c,Rd}} = \frac{277.2}{385.0} = 0.720 \ \leq 1 \ \text{✓}$$

$$T_{E,1} = 213.3\ \text{kN}: \quad FS_{bond,E} = \frac{753.98}{\max(213.3, 250)} = 3.02 \ \geq 1.50 \ \text{✓}$$

$$T_{E,2} = 623.3\ \text{kN}: \quad FS_{bond,E} = \frac{753.98}{623.3} = \mathbf{1.21} \ < 1.50 \quad \text{✗}$$

Le mur initial **ne résiste pas** à ce séisme : l'équilibre sismique exige une fiche de 4.35 m (valeur de dimensionnement 3.12 m) et le scellement du second ancrage est insuffisant ($FS_{bond,E}$ = 1.21 < 1.50, $T_{E,2}$ = 623 kN). La section des palplanches est suffisante (η_E = 0.72) : la fiche et le scellement par injection (longueur ou diamètre) doivent être augmentés.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

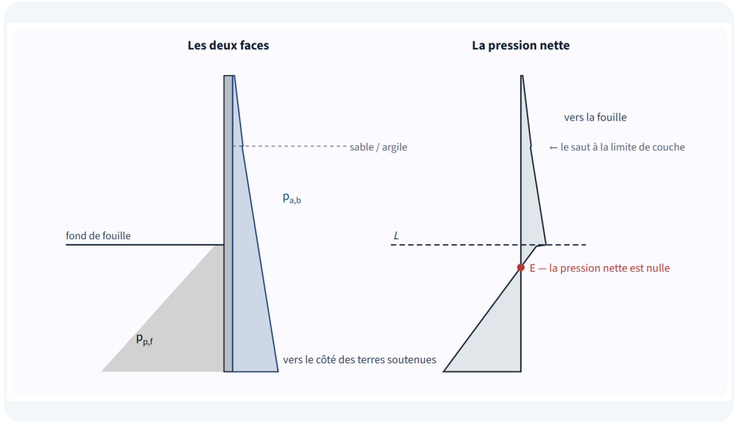
Bloc de soulèvement à la base dans l'argile ; poutre sur sol ressorts

THÉORIE

Soulèvement du fond de fouille : si le fond de fouille est en argile molle, le poids du sol retenu peut refouler l'argile vers la fouille. Comme dans le module d'argile, la vérification s'effectue avec un bloc de capacité portante au pied du mur (B′ = B/√2 ou T jusqu'à la couche dure, la plus petite des deux valeurs ; B″ = √2 B′) :

$$FS = \frac{5.14\, c_u \left(1 + 0.2\frac{B''}{L_{exc}}\right) + \frac{c_{side} H}{B'}}{\sigma_v(H) + q}$$

Les charges en bande et les charges ponctuelles sont converties en une surcharge équivalente dans B′ ; si le sol du fond n'est pas de l'argile, la vérification n'est pas appliquée. **Déplacement** : l'écran est une poutre élastique (EI) avec des ressorts élasto-plastiques sur chaque face (module de réaction du sol k_h) ; chaque tirant est un ressort précontraint ($k = E\, A_t \cos^2\alpha / (L_f s)$, partant de $P_0 \cos\alpha / s$), qui ne reprend que la traction :



Les ressorts partent de la pression au repos ($K_0 \sigma'_v$ dans une couche drainée, σ'_v dans l'argile non drainée) et ne dépassent pas la limite. k_h est un paramètre du modèle ; le résultat est **caractéristique et indicatif**, il est fourni sans bornes ; il dépend fortement de k_h lorsque les ressorts sont souples, et très peu une fois les limites atteintes.

Le moment issu du modèle en déplacement peut être proche du moment d'équilibre limite, mais le moment de dimensionnement est toujours celui de l'équilibre limite.

Énoncé

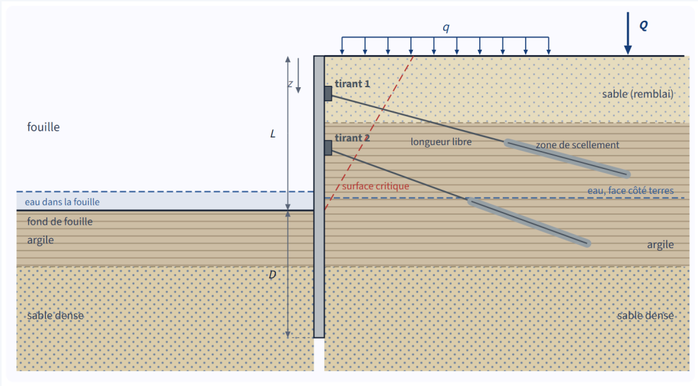
EXEMPLE

Données

Mur	**en haut 3.0 m de sable ($\gamma = 18$, $\varphi' = 30°$), 6.0 m d'argile ($\gamma = 19$, $c' = 5$ kPa, $\varphi' = 24°$, $c_u = 45$ kPa), en dessous du sable dense ($\gamma = 19$, $\varphi' = 36°$) ; $L = 7.5$ m ; eau à 8.5 m sur les deux faces ; $q = 10$ kPa ; deux lits de tirants : $z = 1.5$ m ($15°$) et 4.5 m ($20°$), $s = 2.5$ m ; $f = 1.3$; S275, $W_{el} = 1\,400$ cm³/m**
Fouille et mur	**largeur de la fouille $B = 10$ m (longue, sans couche raide) ; argile sous le fond de fouille ($c_u = 45$ kPa) ; $EI = 44\,100$ kN·m²/m ; $k_h = 20/15/40$ MN/m³ (sable/argile/sable) ; $P_0 = 250$ kN**

À DÉTERMINER

FS_{heave} (≥ 1.5 ?) ; **déplacement** du sommet du rideau, du fond de fouille et du pied ; moment maximal du modèle de déplacement.



Solution

SOLUTION

1 Soulèvement du fond de fouille (B′ = B/√2 = 7.07 m ; L_{exc} non renseigné : pas de terme de forme)

$$c_{side} = \frac{45(4.5)}{7.5} = 27.0\ \text{kPa}\ \ (\text{sable zéro}) \qquad \sigma_v(H) = 18(3) + 19(4.5) = 139.5\ \text{kPa}$$

$$FS = \frac{5.14(45) + 27.0(7.5)/7.07}{139.5 + 10} = \frac{231.3 + 28.6}{149.5} = \mathbf{1.739}\ \geq 1.5\ \checkmark$$

2 Déplacement (méthode du module de réaction du sol ; tirants d'ancrage précontraints)

$$y_{crest} = -2.6\ \text{mm}\ \ (\text{vers l'arrière, du côté du terrain retenu}) \qquad y_{excavation\ base} = 11.2\ \text{mm} \qquad y_{tip} = -0.5\ \text{mm}$$

$$M_{max}^{model} = 108.6\ \text{kN·m/m}\ \ (z = 6.86\ \text{m}) \qquad M_{max}^{limit\ equilibrium} = 121.4$$

Le coefficient de sécurité vis-à-vis du soulèvement du fond de fouille est de **1.74** (≥ 1.5). La tête du mur est tirée **de 2.6 mm vers l'arrière** par les ancrages précontraints ; au niveau du fond de fouille, le mur se déplace de **11.2 mm** vers la fouille (à titre indicatif, sans comparaison à une limite). Le moment du modèle (108.6) est proche du moment d'équilibre limite (121.4).

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Hypothèses du module et ce qu'il ne fait pas

THÉORIE

Hypothèses déclarées : pas de frottement sur l'écran (δ = 0) ; la marge sur la longueur libre est mesurée le long du tendon ; la charge ponctuelle est prise dans la section la plus chargée ; coefficients sismiques couche par couche. **Éléments présentés sous deux formes** : court et long terme (les deux sont calculés), fissure remplie d'eau ou sèche (l'autre cas est indiqué), marge appliquée à la profondeur ou à la butée (l'autre cas est indiqué).

Causes d'arrêt : un ancrage situé hors du mur ; une couche dépourvue de la résistance requise par le scénario ; l'impossibilité de trouver une fiche acceptable ; des ancrages restant en compression dans chaque scénario ; la perte de fermeture ; la zone de scellement située à l'intérieur du coin critique.

Hors du champ : réduction du moment de Rowe (mur flexible), stabilité profonde et stabilité générale (indiquées « non vérifiées » dans chaque calcul avec ancrage), infiltration (des niveaux d'eau différents sont supposés hydrostatiques), surface retenue inclinée, charge linéique et phases de travaux.

Le calcul est **à l'équilibre limite, de prédimensionnement** ; l'interface peut suggérer ce qu'il convient de faire, le rapport indique seulement ce qui a été supposé et ce qui a été trouvé.

Synthèse

Points à retenir

Contrainte : σ_v, u, σ'_v sur les deux faces ; couche drainée Rankine c′–φ′ (**saut de pression** à la limite de couche), argile non drainée $\sigma_v \mp 2c_u$; en surface, **fissure de traction remplie d'eau** (dans l'exemple z_c = 4.37 m)

Les cas **à court terme et à long terme** sont tous deux calculés ; la fiche, les efforts dans les ancrages et le moment retiennent **la plus grande des valeurs des deux scénarios** (dans l'exemple, le long terme partout)

Pression nette = pression retenue – pression côté fouille ; point E ; marge : D = f·D_{th} (2,403 → 3,124 m) ou FS_p sur la butée ; à la fiche donnée, **le moment et l'effort dans le tirant augmentent** (D = 6 m : M = 255 kN·m/m)

Système : rideau autostable (D = 10.4 m, η = 4.2), un lit d'ancrage avec butée simple (M = 296, η = 1.04), deux lits avec méthode des rotules (F_1 = 41.7, F_2 = 132.3 kN/m ; M = 121.4 ; η = 0.43)

Ancrage : T = Fs/cos α (107.9 et 352.0 kN) ; FS de scellement = T_{ult}/max(T, P_0) = 3.02 et 2.14 ; **sismique** : D_E = 4.35 > 3.12 m et $FS_{bond,E}$ = 1.21 < 1.5 : le rideau de palplanches ne résiste pas au séisme

Section : EN 1993-1-1 η = 0.426 ; AISC LRFD 0.561, ASD 0.527. **Soulèvement du fond de fouille** FS = 1.74 ; **déplacement** en tête −2.6 mm, au fond de fouille 11.2 mm (valeur indicative)

Références bibliographiques

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning.

Rankine, W.J.M. (1857). On the stability of loose earth. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 147, 9–27.

Mononobe, N. and Matsuo, H. (1929). On the determination of earth pressure during earthquakes. World Engineering Congress, Tokyo. Okabe, S. (1926). General theory of earth pressure. Journal of the Japan Society of Civil Engineering, 12(1).

Westergaard, H.M. (1933). Water pressures on dams during earthquakes. Transactions of the American Society of Civil Engineers, 98, 418–433.

Bowles, J.E. (1996). Foundation Analysis and Design, 5th ed. McGraw-Hill.

Brent, R.P. (1973). Algorithms for Minimization without Derivatives. Prentice-Hall.

EN 1993-1-1:2005 – Calcul des structures en acier, règles générales.

ANSI/AISC 360-22 — Specification for Structural Steel Buildings.

REMARQUE

L'ensemble des exemples numériques a été produit avec le moteur de calcul propre au module ; le module donne les mêmes valeurs. Le modèle d'ouverture de la page du module correspond également à ce mur (7.5 m de sable–argile–sable, eau à 8.5 m, q = 10 kPa, deux lits de tirants).

GeoTerva

Calculs géotechniques en ligne

De la théorie à la pratique

Saisir dans GeoTerva le profil stratifié de son propre mur (sable et argile), l'eau, la surcharge, les lits de tirants et leurs éléments ; le module fournit conjointement les pressions sur les deux faces, le court et le long terme, la fiche, les efforts dans les ancrages, le moment, ainsi que les vérifications de la section, du scellement, au séisme, au soulèvement du fond de fouille et des déplacements.

Ouvrir sur smartphone
Les modules d'essai ne nécessitent pas d'inscription.

Ouvrir le module →

Page de théorie →

Si vous souhaitez les utiliser dans vos cours : info@geoterva.com