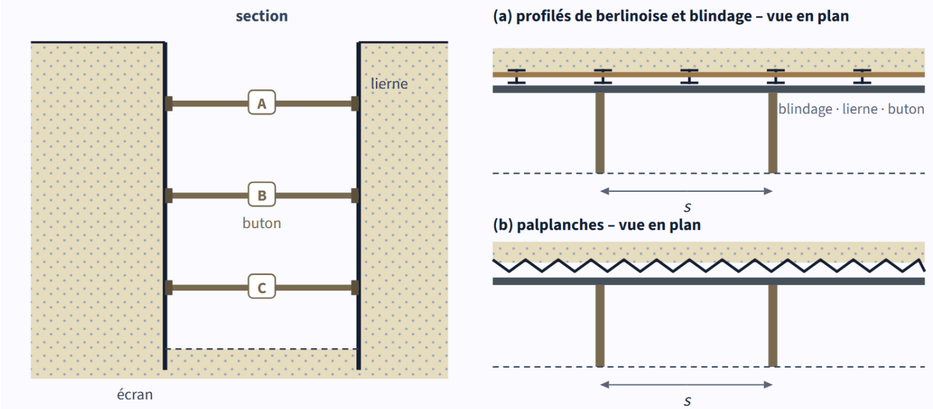
Présentation de cours de géotechnique · Rideaux de palplanches et fouilles étayées

Argile sur sable : fouille étayée

Cours : sable et argile dans une même fouille (cohésion équivalente de Peck) ; enveloppe, efforts dans les butons, dimensionnement du rideau de palplanches et des liernes, vérification de l'acier et soulèvement du fond de fouille ; un exemple de calcul pour chaque sujet.

Soutènement de fouille | Argile équivalente (sable + argile) | Buton · lierne · palplanche | EN 1993 · AISC 360 | Soulèvement du fond



Que verrons-nous dans ce cours ?

Pourquoi la pression dans une fouille étayée n'est **pas celle de Rankine** et comment les enveloppes sont construites ; les enveloppes dans l'argile (avec γH/c)

Pour une fouille traversant du sable et de l'argile, la **cohésion équivalente** de Peck c_{av} et γ_a ; le choix de l'enveloppe d'après $\gamma_a H/c_{av}$

La manière dont la fouille de National Plaza (Chicago) moyenne d'abord **plusieurs argiles** selon l'épaisseur, puis les combine avec le sable

L'ajout de la surcharge à côté de l'enveloppe ; à partir de l'enveloppe, les **efforts dans les butons**, le dimensionnement du **rideau de palplanches** et des **liernes**

Vérifier l'acier selon l'**EN 1993-1-1 et l'AISC 360-22** ; la vérification du **soulèvement du fond de fouille** dans un profil stratifié

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

Fouille de l'exemple : en haut 3 m de sable (γ = 17 kN/m³, φ′ = 30°) sur de l'argile (γ = 18 kN/m³, c = 35 kPa) ; H = 7.00 m, B = 6.00 m ; butons aux profondeurs 1.00 · 3.50 · 6.00 m, espacement horizontal s = 3.00 m. Les efforts sont donnés par mètre de mur (efforts dans les butons multipliés par s).

Système de soutènement et ses éléments

THÉORIE

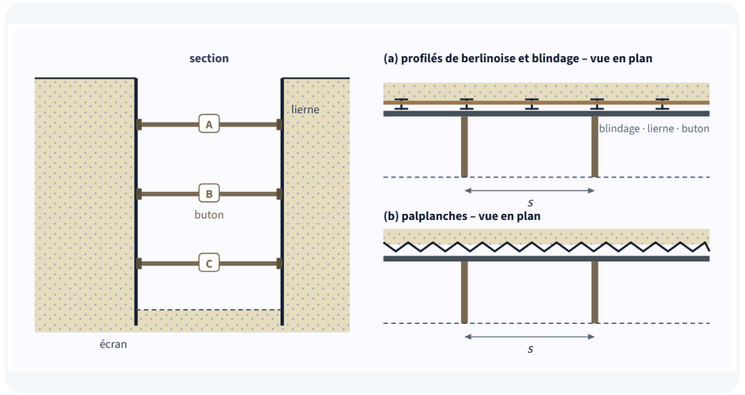
Les fouilles profondes à parois verticales (sous-sols en site urbain, tunnels en tranchée couverte) sont maintenues ouvertes par un **système de soutènement** provisoire. Deux dispositions sont courantes : entre des **profilés verticaux** (en acier ou en bois) battus au préalable, un blindage horizontal en bois est mis en place au fur et à mesure de l'avancement de la fouille ; ou des **palplanches** emboîtées forment une paroi continue.

À chaque niveau d'appui, des **liernes** horizontales sont mises en place dès que la fouille atteint ce niveau ; les **butons** sont des éléments horizontaux en acier, travaillant en compression, qui traversent la fouille d'une lierne à l'autre.

Pour choisir les éléments, il faut connaître la pression latérale que le système de soutènement devra reprendre. La théorie donne la poussée totale, mais non sa **répartition** : celle-ci dépend du sol, de l'ordre et de la cadence des travaux, de l'équipe et du matériel.

Les pressions de calcul sont donc des **enveloppes empiriques** : tracées autour des pressions rétro-calculées à partir des efforts dans les butons mesurés sur des fouilles réelles.

En cours de travaux, l'espacement vertical des butons doit être d'au moins environ 2.75 m.



Rotation autour du sommet du mur

THÉORIE

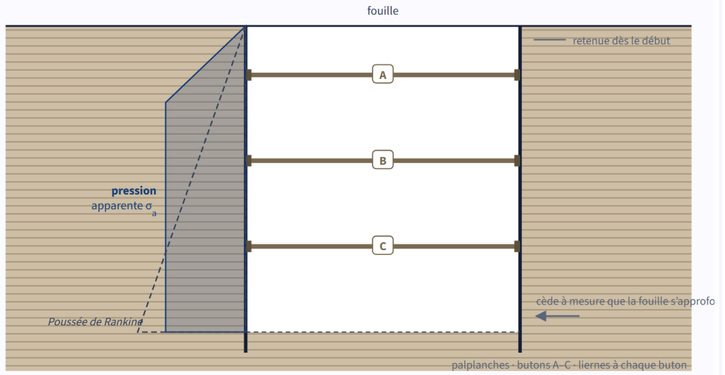
Un mur de soutènement en T renversé tourne autour de sa base, et la poussée active de Rankine (nulle en haut, maximale en bas) le décrit bien. **Une paroi étayée se déplace en sens inverse** : le premier buton est posé lorsque la fouille est peu profonde, de sorte que la partie supérieure ne bouge presque pas ; chaque phase suivante est excavée avant la pose du buton, et l'intervalle s'allonge avec la profondeur, si bien que la paroi fléchit progressivement plus bas : à la fin de l'excavation, elle a **tourné autour de sa tête**.

En haut, la pression reste proche de la **valeur au repos** (le sol s'est très peu déplacé).

En partie basse, la pression peut descendre sous la valeur active de Rankine (le sol a depuis longtemps dépassé l'équilibre plastique).

La poussée résultante P_a s'exerce **au-dessus** du tiers du triangle : à la hauteur n_aH au-dessus de la base, avec $n_a > 1/3$.

La poussée totale est obtenue avec le coin à spirale logarithmique ($r = r_o e^{\theta \tan \varphi'}$) ; dans un sol granulaire, elle dépasse de 15–20 % la valeur de Coulomb. Mais comme sa répartition et n_a dépendent du sol et du chantier, les fouilles sont dimensionnées avec des **enveloppes**.



Comment les enveloppes ont-elles été construites ?

THÉORIE

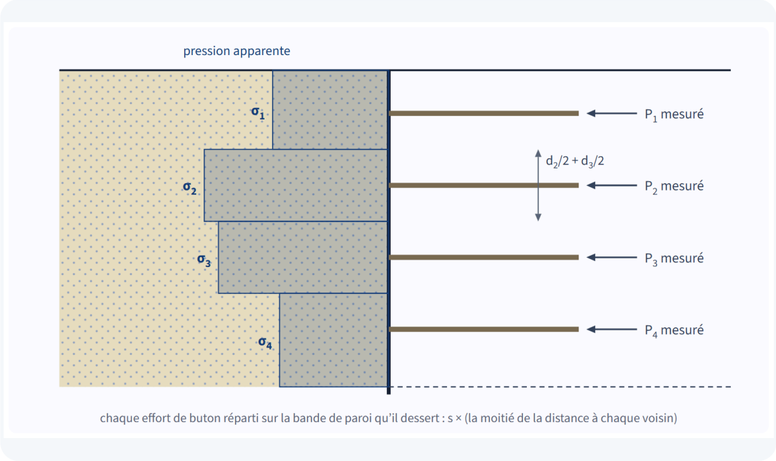
La pression varie d'un point à l'autre et chaque buton doit être dimensionné pour la **charge maximale** qu'il peut rencontrer. Des enveloppes sont construites à cet effet : dans une fouille instrumentée, la charge de chaque buton est mesurée, divisée par la bande de paroi qu'il soutient (espacement horizontal s × moitié des distances aux butons supérieur et inférieur) et convertie en **pression apparente** sur cette bande :

$$\sigma_1 = \frac{P_1}{s\left(d_1 + \frac{d_2}{2}\right)} \qquad \sigma_i = \frac{P_i}{s\left(\frac{d_i}{2} + \frac{d_{i+1}}{2}\right)}$$

d_1 est la profondeur du premier buton, d_i les distances entre les butons suivants. Le contour de l'ensemble des diagrammes superposés est une **enveloppe des pressions apparentes**.

Les enveloppes de Peck proviennent des charges mesurées dans le sable lors des fouilles de métro de Berlin, Munich et New York ; il les a établies par la même méthode pour les argiles molles à moyennes et pour les argiles raides.

L'enveloppe n'est **pas** la pression qui s'exerce sur le mur à un instant donné : la charge qui en est déduite pour un appui est tracée de manière à rester du côté de la sécurité par rapport aux charges mesurées.



Mou–moyen ou raide : γH/c

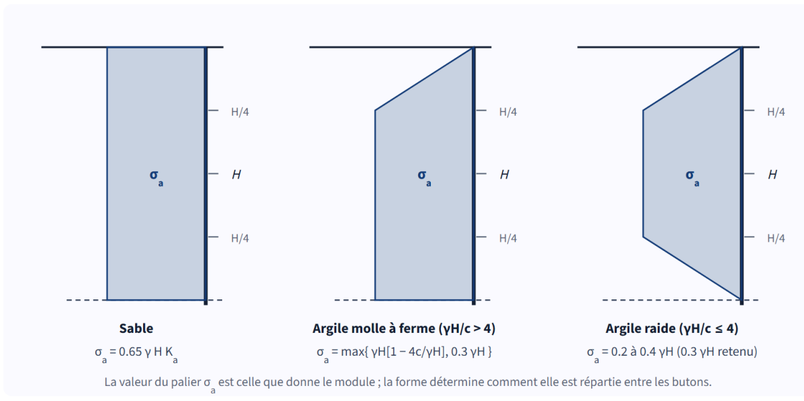
THÉORIE

Dans l'argile, la forme de l'enveloppe est gouvernée par le **nombre de stabilité γH/c** (c cohésion non drainée, φ = 0). Une **argile molle à moyenne** avec γH/c > 4 est sollicitée par la fouille bien au-delà de sa résistance ; une **argile raide** est plus proche de son domaine élastique :

$$\frac{\gamma H}{c} > 4 : \quad \sigma_a = \max\left(\gamma H \left[1 - \frac{4c}{\gamma H}\right], 0.3\gamma H\right) \qquad \frac{\gamma H}{c} \leq 4 : \quad \sigma_a \approx 0.3\gamma H$$

L'enveloppe pour argile molle à moyenne est nulle en surface, augmente dans le quart supérieur, puis forme un palier constant jusqu'à la base ; l'enveloppe pour argile raide augmente dans le quart supérieur, est constante dans la moitié centrale et retombe à zéro dans le quart inférieur. La plus grande des deux expressions est déterminante.

Conditions : profondeur de fouille ≳ 6 m ; eau sous le fond de fouille ; argile non drainée (la pression interstitielle n'est pas prise en compte).



La valeur du palier σ_a est celle que donne le module ; la forme détermine comment elle est répartie entre les butons.

Cohésion équivalente de Peck

THÉORIE

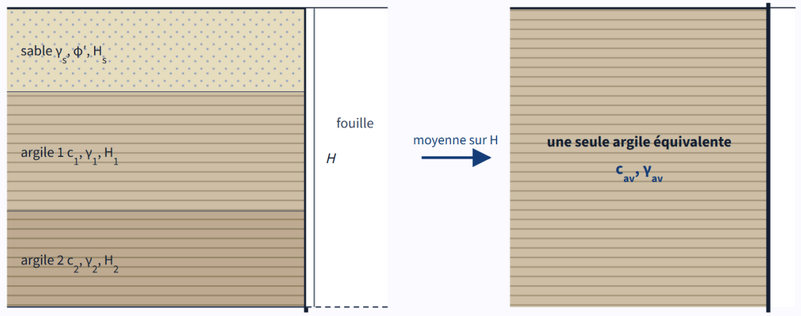
Lorsque la fouille comporte à la fois du sable et de l'argile, le profil de Peck est remplacé par **une argile unique** : elle fait la moyenne de la résistance que le sol peut mobiliser sur la hauteur. Le sable apporte le frottement dû à son propre poids, l'argile sa résistance à la compression simple (réduite pour la rupture progressive) :

$$c_{av} = \frac{1}{2H}\left[\gamma_s K_s H_s^2 \tan\varphi'_s + (H - H_s)\, n' q_u\right] \qquad \gamma_a = \frac{1}{H}\left[\gamma_s H_s + (H - H_s)\gamma_c\right]$$

H_s, γ_s, φ'_s : hauteur, poids volumique et angle de frottement effectif du sable ; K_s : coefficient de pression latérale du sable (≈ 1) ; $q_u = 2c$: résistance à la compression simple de l'argile, γ_c : son poids volumique saturé ; n' : coefficient de rupture progressive, 0.5–1.0 (moyenne 0.75).

Avec c_{av} et γ_a, les enveloppes pour argile sont appliquées sur toute la hauteur ; l'enveloppe est choisie à partir de $\gamma_a H/c_{av}$.

S'il existe plusieurs argiles sous le sable, la référence les moyenne d'abord en fonction de l'épaisseur ($c_{av} = \Sigma c_i H_i/\Sigma H_i$, γ_{av}), puis associe cette argile équivalente au sable (comme dans le cas de National Plaza).



sable : frottement dû au poids propre $\gamma K_s H_s^2 \tan\phi'$ · argile : $n' q_u H$ · les deux sommés sur la hauteur, puis la règle de l'argile s'applique

Énoncé

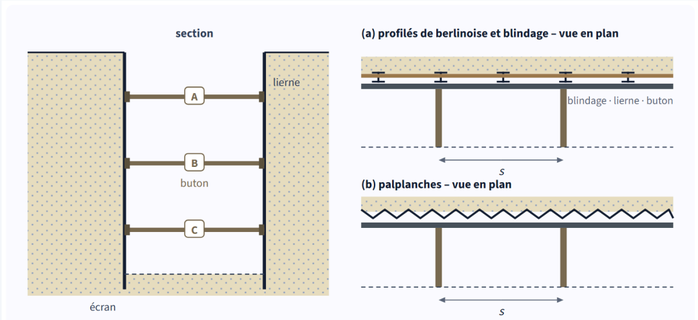
EXEMPLE

Données

Profil	**en haut $H_s = 3$ m de sable ($\gamma_s = 17$ kN/m³, $\varphi'_s = 30°$, $K_s = 1$), en dessous de l'argile ($\gamma_c = 18$ kN/m³, $c = 35$ kPa)**
Fouille et coefficient	$H = 7.0$ **m ;** $n' = 0.75$ **(moyenne) ; également** $n' = 0.5$ **et** 1.0

À DÉTERMINER

c_{av}, γ_a, $\gamma_a H/c_{av}$, type d'enveloppe et σ_a ; résultat en fonction de la variation de n′.



Solution (1/2)

SOLUTION

1 Cohésion et poids volumique équivalents (n′ = 0.75)

$$c_{av} = \frac{1}{2(7)}\left[17(1)(3)^2\tan 30^\circ + (7-3)(0.75)(2\cdot 35)\right] = \frac{88.33+210.0}{14} = \mathbf{21.31}\ \text{kPa}$$

$$\gamma_a = \frac{17(3)+(7-3)18}{7} = \mathbf{17.57}\ \text{kN/m}^{\mathbf{3}} \qquad \frac{\gamma_a H}{c_{av}} = \frac{17.57(7)}{21.31} = \mathbf{5.77} > 4$$

Argile équivalente : c_{av} = **21.31 kPa**, γ_a = 17.57 kN/m³ ; $\gamma_a H/c_{av}$ = **5.77** > 4 → enveloppe d'argile molle à moyenne.

Solution (2/2)

SOLUTION

2 Enveloppe des argiles molles à moyennes et sensibilité à n′

$$\sigma_a = \gamma_a H \left[1 - \frac{4c_{av}}{\gamma_a H}\right] = 17.57(7) - 4(21.31) = \mathbf{37.75}\ \text{kPa}$$

n′	c_{av} (kPa)	$\gamma_a H/c_{av}$	σ_a (kPa)	P_{max} (kN)
0.50	16.31	7.54	57.75	424.5
0.75	21.31	5.77	37.75	277.5
1.00	26.31	4.67	36.90	271.2

Argile équivalente : c_{av} = **21.31 kPa**, $\gamma_a H/c_{av}$ = 5.77 > 4 : enveloppe de l'argile molle à moyenne, **σ_a = 37.75 kPa**. Si n′ = 0.5 est adopté, c_{av} descend à 16.31 et σ_a monte à 57.8 kPa : le coefficient de rupture progressive influe fortement sur le résultat.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Énoncé

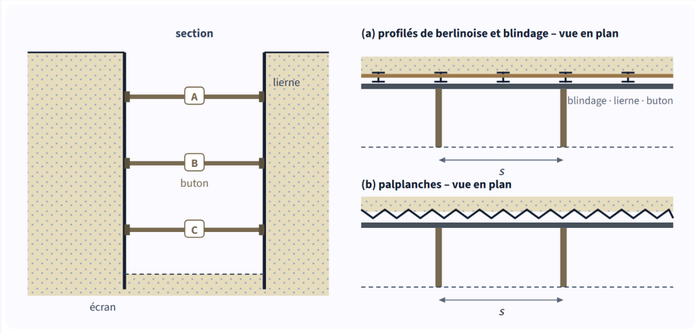
EXEMPLE

Données

Fouille	$H = 70$ ft $= 21.34$ m de profondeur, six butons ; sous le remblai, 13 ft de sable puis quatre couches d'argile (tableau ci-dessous, SI)
Coefficients	$K_s = 1$, $\varphi'_s = 30°$, $n' = 0.75$

À DÉTERMINER

Moyenne de l'argile pondérée par l'épaisseur $c_{av,arg}$; c_{av}, γ_{av}, $\gamma H/c$ et σ_a.



Solution (1/2)

SOLUTION

1 Profil (SI) et argile moyennée sur l'épaisseur

Couche	Épaisseur (m)	γ (kN/m³)	c (kPa)	Terme de contribution (kN/m)
Remblai de sable	3.96	17.28	—	156.6
Argile 1	10.06	19.95	19.2	289.0
Argile 2	3.35	20.42	33.5	168.6
Argile 3	1.83	21.21	95.8	262.7
Argile 4	2.13	21.21	191.5	612.9

$$c_{av,clay} = \frac{\Sigma c_i H_i}{\Sigma H_i} = \mathbf{51.16}\ \mathrm{kPa}$$

La moyenne pondérée par l'épaisseur des quatre argiles est de **51.16 kPa** ; terme du sable $\gamma_s K_s H_s^2 \tan \varphi'_s$ = 156.6, terme de l'argile $n' q_u \Sigma H_i$ = 1,333.2 kN/m.

Solution (2/2)

SOLUTION

2 Cohésion équivalente, poids volumique et enveloppe

$$c_{av} = \frac{\gamma_s K_s H_s^2 \tan\varphi'_s + n' q_u \Sigma H_i}{2H} = \frac{156.6 + 1{,}333.2}{2(21.34)} = \mathbf{34.91}\ \mathrm{kPa}$$

$$\gamma_{av} = \frac{\Sigma \gamma_i H_i}{H} = \mathbf{19.76}\ \mathrm{kN/m^3} \qquad \frac{\gamma_{av} H}{c_{av}} = \frac{19.76(21.34)}{34.91} = \mathbf{12.08}\ > 4$$

$$\sigma_a = \gamma_{av} H \left[1 - \frac{4c_{av}}{\gamma_{av} H}\right] = \mathbf{282.0}\ \mathrm{kPa}$$

L'enveloppe de l'argile molle à moyenne est appliquée : **σ_a = 282.0 kPa** (c_{av} = 34.91 kPa, γ_{av} = 19.76 kN/m³, $\gamma_{av}H/c_{av}$ = 12.08). La comparaison de cette enveloppe avec les efforts observés dans les liernes figure dans la section « Enveloppes dans les fouilles réelles » (enveloppe de Peck ≈ 1.8 fois).

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Ajouté à côté de l'enveloppe

THÉORIE

La **surcharge q** n'est pas intégrée à l'enveloppe (les coefficients empiriques lui seraient alors également appliqués) ; elle est reprise comme une pression uniforme propre sur toute la hauteur, avec $K_a = 1$ en argile non drainée : $\Delta p_q = q$.

Eau : les enveloppes dans l'argile relèvent d'une approche non drainée, en contraintes totales ; l'eau de l'argile est déjà comprise dans le poids volumique et dans la résistance non drainée. L'eau au-dessus du fond est représentée et notée, mais n'est pas ajoutée comme charge distincte ; elle ne modifie que le poids du sol : poids volumique saturé sous l'eau et, dans la couche coupée par l'eau, moyenne des deux valeurs pondérée par l'épaisseur.

L'épaisseur de la couche de sable déterminant l'argile équivalente, l'**ordre des couches** du profil influe directement sur le résultat : c_{av} varie à mesure que le sable s'épaissit (exemple ci-dessous).

$$\Delta p_q = K_a q = q \;\; (\varphi = 0 \Rightarrow K_a = 1)$$

$$\gamma = \frac{\gamma z_w + \gamma_{sat}(H - z_w)}{H}$$

Énoncé

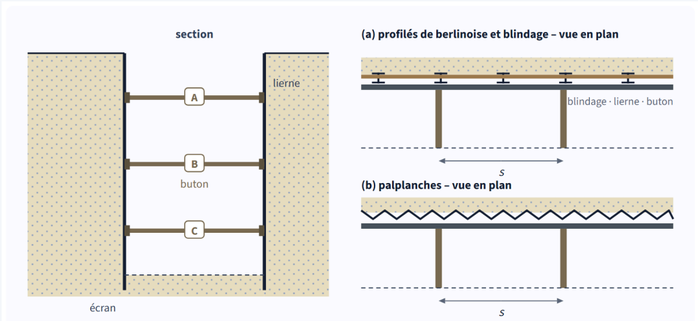
EXEMPLE

Données

Fouille	**La fouille de l'exemple 1 ($H = 7$ m, $n' = 0.75$) : sable 3 m (excavation)**
Modifications	**(a) sable de 5 m d'épaisseur (argile 2 m) ;** **(b) surcharge $q = 10$ kPa**

À DÉTERMINER

Dans chaque cas : c_{av}, $\gamma_a H/c_{av}$, σ_a, charge totale R et effort maximal dans les butons.



Solution (1/2)

SOLUTION

1 (a) Sable 5 m : argile équivalente reconstituée

$$c_{av} = \frac{1}{14}\left[17(5)^2 \tan 30^\circ + (2)(0.75)(70)\right] = 25.03 \text{ kPa}$$

$$\gamma_a = \frac{17(5) + 2(18)}{7} = 17.29 \text{ kN/m}^3$$

$$\sigma_a = \max\left(\gamma_a H - 4c_{av},\, 0.3\gamma_a H\right) = \max(20.91, 36.31) = \mathbf{36.31} \text{ kPa}$$

Lorsque le sable atteint 5 m, la cohésion équivalente passe de 21.3 à **25.0 kPa** et c'est **$0.3\gamma_a H$ = 36.3 kPa** qui détermine l'enveloppe.

Solution (2/2)

SOLUTION

2 (b) Surcharge : séparément $\Delta p_q = q = 10$ kPa ; synthèse des trois cas

État	c_{av} (kPa)	γ_a (kN/m³)	$\gamma_a H/c_{av}$	σ_a (kPa)	R (kN/m)	P_{max} (kN)
Fouille (sable 3 m)	21.31	17.57	5.77	37.75	231.2	277.5
(a) sable 5 m	25.03	17.29	4.84	36.31	222.4	266.9
(b) q = 10 kPa	21.31	17.57	5.77	37.75	301.2	351.0

Lorsque l'épaisseur de sable augmente, c_{av} passe de 21.3 à 25.0 kPa et l'enveloppe diminue de 37.8 à **36.3 kPa** (le sable frottant apporte plus de résistance que l'argile ; c'est désormais le terme $0.3\gamma_a H$ qui gouverne). La surcharge n'affecte pas l'enveloppe : elle ajoute seulement $\Delta p_q = 10$ kPa (R de 231.2 à 301.2 kN/m).

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

De l'enveloppe aux efforts dans les supports

THÉORIE

Les butons sont des colonnes horizontales : ils transmettent la pression le long de leur axe, fléchissent sous leur propre poids ; leur capacité dépend de l'élancement et les fouilles larges peuvent exiger des appuis supplémentaires. La source fournit pour la charge une méthode simple et prudente :

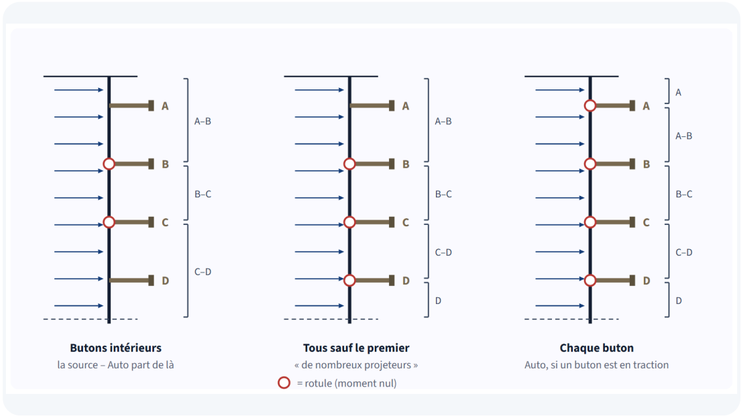
Tracer l'enveloppe des pressions et les niveaux d'appui. Considérer le rideau de palplanches comme **articulé à chaque niveau d'appui**, à l'exception du plus haut et du plus bas (de nombreux projeteurs le font à tous les niveaux sauf le plus haut).

Diviser le mur aux rotules en **consoles simples aux extrémités et en poutres simples entre elles** ; déterminer les réactions de chaque partie par la statique (pour une fouille à quatre appuis, A, B_1, B_2, C_1, C_2, D).

La charge d'un appui est la somme des réactions qu'il reçoit × l'espacement horizontal s.

$$P_A = A\,s \quad P_B = (B_1 + B_2)\,s \quad P_C = (C_1 + C_2)\,s \quad P_D = D\,s$$

Chaque tronçon est isostatique : il repose sur deux appuis ; l'équilibre des moments par rapport à l'un des appuis et l'équilibre des forces horizontales donnent les deux réactions. L'appui situé sur la rotule appartenant aux deux côtés, il cumule **deux réactions**. Les réactions sont exprimées par unité de longueur du mur (kN/m) ; s les convertit en charge d'appui.



Énoncé

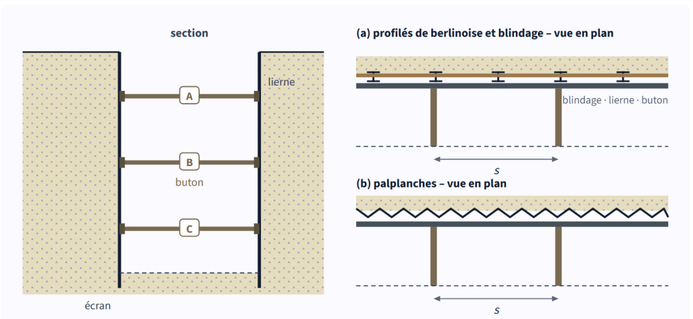
EXEMPLE

Données

Fouille	$H = 7.00$ m ; $B = 6$ m ; butons $z = 1.00, 3.50, 6.00$ m (A, B, C) ; espacement horizontal $s = 3.00$ m
Pression	Exemple 1 : argile équivalente, enveloppe de type mou à moyen $\sigma_a = 37.75$ kPa (croît dans le quart supérieur, constante jusqu'à la base) ; rideau de palplanches articulé au niveau du buton B (sauf en tête et en pied)

À DÉTERMINER

La **résultante W** des parties et son bras de levier **z̄** ; les réactions **A, B_1, B_2, C** ; les efforts dans les butons **P_A, P_B, P_C**.



Solution (1/2)

SOLUTION

1 Diviser l'enveloppe en parties au niveau des rotules ; résultante et bras de levier de chaque partie (profondeur depuis la surface supérieure)

Élément	Plage (m)	W (kN/m)	z̄ (m)	Appuis
1	0.00 – 3.50	99.09	2.139	A (z = 1.00), B (z = 3.50)
2	3.50 – 7.00	132.12	5.250	B (z = 3.50), C (z = 6.00)

2 Première partie : équilibre des moments par rapport au premier appui

$$R_{B_2} = \frac{W(\bar{z} - z_A)}{z_B - z_A} = \frac{99.09(2.139 - 1.00)}{3.50 - 1.00} = \mathbf{45.14} \qquad R_A = W - R_{B_2} = \mathbf{53.95}\ \mathrm{kN/m}$$

La première travée porte les deux appuis avec 53.95 et 45.14 kN/m ; la réaction de l'appui le plus haut (A) est plus grande, car elle comprend aussi la charge de la partie en console.

Solution (2/2)

SOLUTION

3 Deuxième partie

$$R_C = \frac{W(\bar{z} - z_B)}{z_C - z_B} = \frac{132.12(5.250 - 3.50)}{6.00 - 3.50} = \mathbf{92.49} \qquad R_{B_1} = W - R_C = \mathbf{39.64}\ \mathrm{kN/m}$$

4 Chaque appui cumule les réactions qu'il reçoit ; charge = total × s (s = 3.00 m)

Niveau	z (m)	Réactions reçues (kN/m)	Total (kN/m)	P = R·s (kN)
A	1.00	53.95	53.95	**161.85**
B	3.50	45.14 + 39.64	84.78	**254.34**
C	6.00	92.49	92.49	**277.47**

L'effort maximal dans les appuis est **P_C = 277.47 kN** (niveau C) : cet effort détermine le dimensionnement du buton. L'appui B appartenant à deux parties, il cumule deux réactions.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Moment maximal et module de résistance requis

THÉORIE

Le **rideau de palplanches** est dimensionné à partir des mêmes parties : on détermine dans chaque partie le moment fléchissant maximal (là où l'effort tranchant change de signe : dans la travée ou sur l'appui où le porte-à-faux rejoint le buton) ; le plus grand est le moment de calcul par unité de longueur de mur. Le module de résistance requis découle de la contrainte de flexion admissible, et une section ayant au moins cette valeur est choisie dans le tableau :

$$M_{max} = \max_{parts} |M| \qquad S = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}}$$

Les **liernes** peuvent être considérées comme continues si leurs éléments sont convenablement assemblés ; par prudence, elles sont prises **articulées** au droit des butons : poutre simplement appuyée de portée s, la réaction du niveau R (par unité de longueur du mur) constituant la charge répartie :

$$M_{max} = \frac{R\,s^2}{8} \qquad S = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}}$$

Le niveau où la réaction est la plus grande est déterminant. Les liernes sont parfois fixées au rideau de palplanches en des points qui leur procurent l'appui latéral dont elles ont besoin.

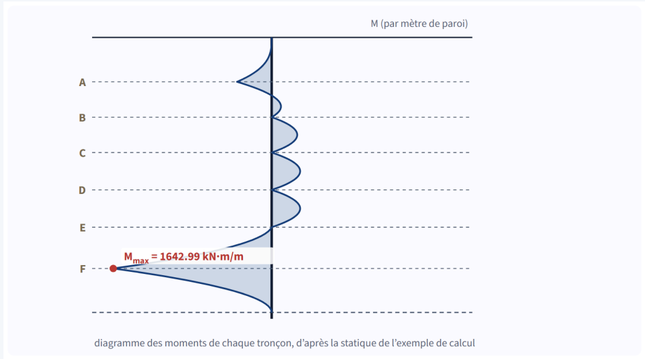
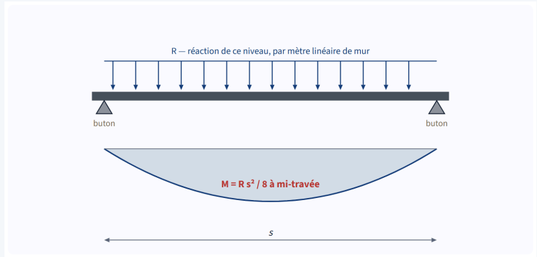


diagramme des moments de chaque tronçon, d'après la statique de l'exemple de calcul



Énoncé

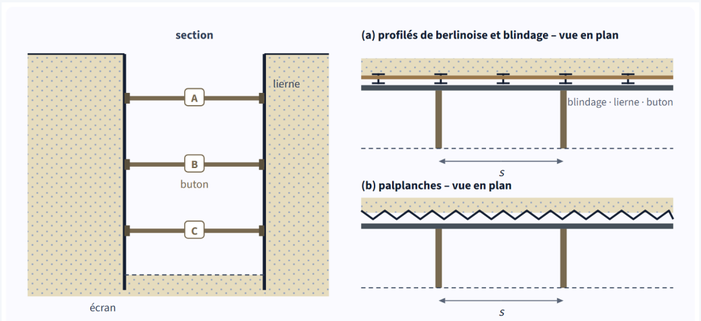
EXEMPLE

Données

Fouille	**La fouille de l'Exemple 1 ($H = 7$ m, argile équivalente, $\sigma_a = 37.75$ kPa) ; butons à 1.0 · 3.5 · 6.0 m ; $s = 3.0$ m ; rotule en B**
Acier	**contrainte de flexion admissible $\sigma_{allow} = 170\,000$ kPa**

À DÉTERMINER

M_{max} du rideau de palplanches et **S** requis (cm³/m) ; au niveau de la réaction maximale, **M_{max}** et **S** de la lierne (cm³).



Solution (1/2)

SOLUTION

1 Rideau de palplanches : moment maximal dans chaque partie

Élément	Plage (m)	M_{max} (kN·m/m)	Position z (m)
1	0.00 – 3.50	26.99	2.30
2	3.50 – 7.00	20.81	4.55

2 Module de résistance requis

$$S = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}} = \frac{26.99}{170{,}000} = 0.0001588\ \mathrm{m^3/m} = \mathbf{158.8}\ \mathrm{cm^3/m}$$

Dans le rideau de palplanches : **M_{max} = 26.99 kN·m/m** (tronçon 1, z = 2.30 m) : **S ≥ 158.8 cm³/m**.

Solution (2/2)

SOLUTION

3 Lierne : poutre simple à chaque niveau (s = 3.000 m)

Niveau	R (kN/m)	M = R s²/8 (kN·m)	S = M/σ_{adm} (cm³)
A	53.95	60.69	357
B	84.78	95.38	561
C	92.49	104.05	612

La réaction maximale se situe **au niveau C** (R = 92.49 kN/m) : la lierne est dimensionnée avec **M_{max} = 104.05 kN·m**, **S ≥ 612 cm³** ; les liernes des autres niveaux peuvent être plus petites.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Effets de calcul, classe, flexion et flambement

THÉORIE

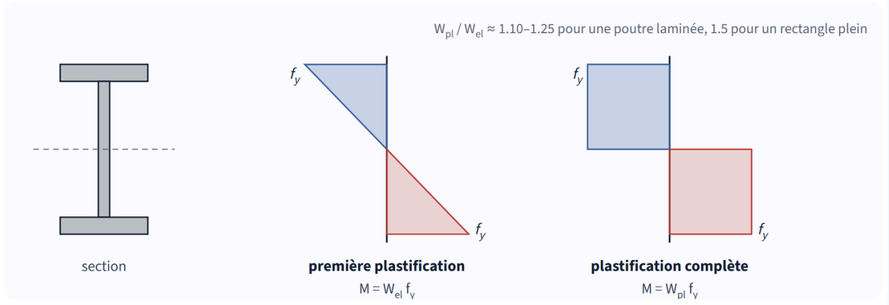
Les charges issues de l'enveloppe sont des **valeurs de service** (l'enveloppe de Peck est une borne supérieure des charges mesurées) ; elles sont portées une seule fois à la valeur de calcul : $E_d = \gamma_F E_k$. Chaque élément est vérifié avec la limite d'élasticité (f_y) de sa nuance d'acier ; la section est définie par le **module de résistance** de l'élément (rideau de palplanches : W_{el} par mètre ; lierne : W ; buton : A et I selon l'axe faible).

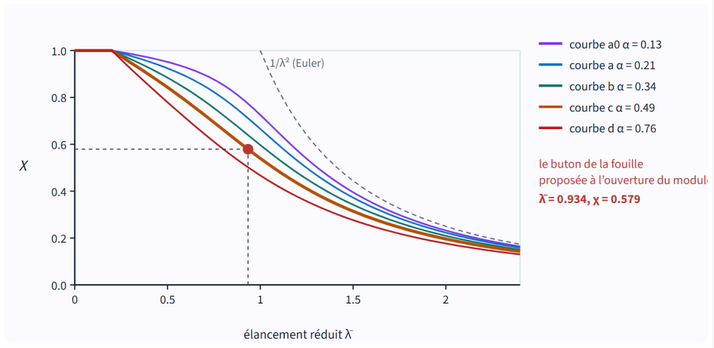
$$M_{c,Rd} = \frac{W f_y}{\gamma_{M0}} \qquad \eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \le 1 \qquad W = W_{pl}\ (\text{classe 1–2}),\ W_{el}\ (\text{classe 3})$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} \qquad \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \qquad \Phi = 0.5\left[1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2\right] \qquad \chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \le 1 \qquad N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}$$

Le buton flambe selon son axe faible : I est le plus petit moment d'inertie, $L_{cr} = K L_b$ la longueur efficace (largeur de la fouille, si aucun pieu-roi ni aucun croisillon n'est intercalé). α provient de la courbe de flambement (courbe c : 0.49).

Pour le rideau de palplanches, la même résistance s'applique par unité de largeur (EN 1993-5 ; glissement des serrures β_B pour les profils en U, 1.0 pour les profils en Z). La semelle comprimée de la lierne s'appuyant contre l'écran, le déversement n'est pas déterminant.





Énoncé

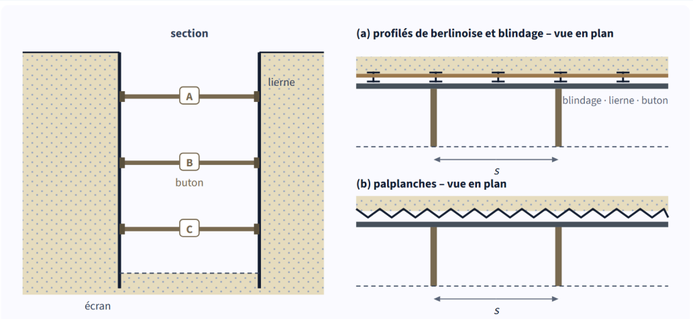
EXEMPLE

Données

Fouille et charges	**La fouille de l'exemple 1 et les charges de l'exemple 4 : $P_{max} = 277.47$ kN**
Éléments	**S275 ($f_y = 275$ MPa), $\gamma_F = 1.35$, $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1.00$: rideau de palplanches $W_{el} = 600$ cm³/m ; lierne $W_{el,y} = 1\,000$ cm³ ; buton $A = 65.7$ cm², $I = 3\,598$ cm⁴, courbe c, $L_{cr} = 6.00$ m**

À DÉTERMINER

η (≤ 1) pour le rideau de palplanches, la lierne la plus chargée et le buton le plus chargé.



Solution (1/2)

SOLUTION

1 Rideau de palplanches et lierne (flexion) : $\eta = \gamma_F M/(W f_y)$

$$\eta_{sp} = \frac{1.35(26.99)}{600 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{36.44}{165.0} = \mathbf{0.221}$$

$$\eta_{belt} = \frac{1.35(104.05)}{1\,000 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{140.47}{275.0} = \mathbf{0.511}$$

Palplanche η = **0.221**, lierne η = **0.511** : toutes deux sont suffisantes ($\eta \leq 1$).

Solution (2/2)

SOLUTION

2 Buton (flambement) : $N_{Ed} = 1.35\ P_{max} = 1.35(277.47) = 374.58$ kN

$$N_{cr} = \frac{\pi^2(210\,000\,000)(3\,598 \cdot 10^{-8})}{6.00^2} = 2{,}071.5\ \text{kN}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{1\,806.8}{2{,}071.5}} = 0.9339$$

$$\Phi = 0.5\left[1 + 0.49(0.9339 - 0.2) + 0.9339^2\right] = 1.1159$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0.5791 \quad N_{b,Rd} = \chi A f_y = 1{,}046.4\ \text{kN}$$

η_{buton} = 374.6 / 1,046.4 = **0.358**. Les trois éléments sont suffisants ($\eta \le 1$) ; pour le buton, c'est le **flambement** qui est déterminant ($N_{c,Rd}$ = 1,806.8 kN, $N_{b,Rd}$ = 1,046.4 kN).

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

LRFD ou ASD ; classes, flexion, cisaillement, courbe de flambement

THÉORIE

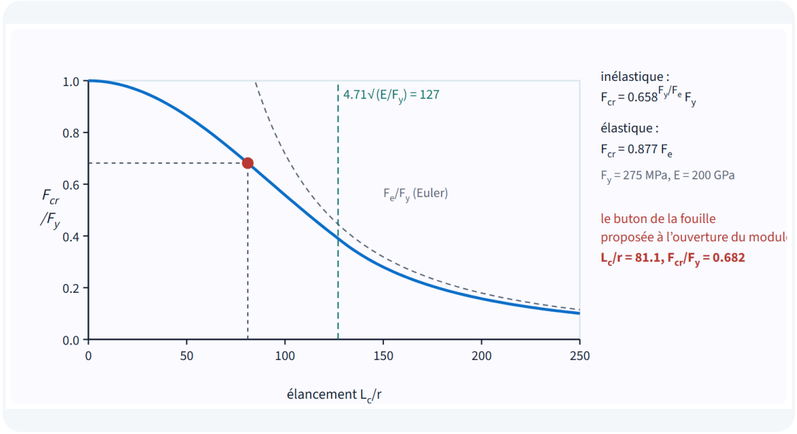
Chaque élément est vérifié avec la **résistance nominale R_n** déterminée à partir des dispositions relatives à la compression, à la flexion et au cisaillement. En LRFD, la charge est majorée et la résistance réduite par φ ; en ASD, la charge de service est comparée à la résistance divisée par le coefficient de sécurité Ω :

$$R_u \le \phi R_n \ (\text{LRFD}) \qquad R_a \le \frac{R_n}{\Omega} \ (\text{ASD}) \qquad P_u = \gamma_H P,\ M_u = \gamma_H M,\ \gamma_H = 1.6$$

Les charges issues de l'enveloppe constituent la **poussée latérale des terres H** de l'ASCE 7-22 : dans les combinaisons LRFD, elle intervient avec 1.6 partout où elle s'ajoute à la charge (toujours dans les étaiements de fouille), et avec 1.0 en ASD. Le rideau de palplanches et la lierne fournis par le module sont pris avec la résistance revendiquée par le module : F_yZ en section compacte, F_yS à la première plastification. La lierne étant maintenue latéralement par la paroi, $L_b = 0$ et le déversement n'est pas un état limite.

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(L_c/r)^2} \quad F_{cr} = 0.658^{F_y/F_e} F_y \ \left(\tfrac{L_c}{r} \le 4.71\sqrt{E/F_y}\right) \ \text{sinon } 0.877F_e \quad P_n = F_{cr} A_g$$

Une **courbe de flambement unique** sert pour toutes les sections (pas de courbe à choisir comme dans l'EN 1993-1-1) ; r est le rayon de giration minimal, $L_c = K\,L_b$ la longueur de flambement ; $L_c/r \le 200$ est recommandé. L'AISC, contrairement à l'EN 1993-1-1, ne réduit pas la résistance en flexion du fait de l'effort tranchant.



Énoncé

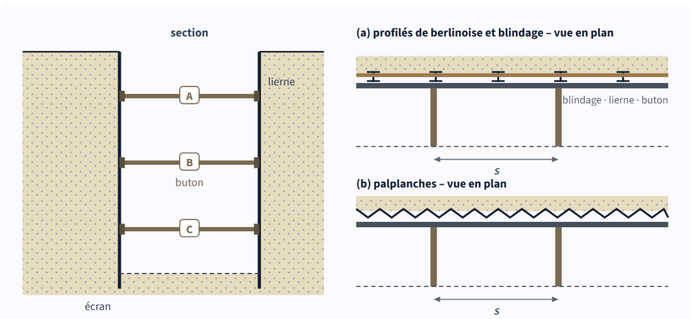
EXEMPLE

Données

Fouille et charges	**La fouille de l'exemple 1 et les charges de l'exemple 4 : $P_{max} = 277.47$ kN**
Éléments	**Éléments de l'exemple 6 (S275, $F_y = 275$ MPa) ; $E = 200$ GPa ; LRFD $\gamma_H = 1.6$, $\phi_c = \phi_b = 0.90$; ASD $\Omega_c = 1.67$, $\Omega_b = 1.67$ ($M_n = F_y S$)**

À DÉTERMINER

Pour le buton le plus sollicité : **L_c/r, F_e, F_{cr}, P_n** ; rapports LRFD et ASD ; rapport LRFD pour le rideau de palplanches et la lierne.



Solution (1/2)

SOLUTION

1 Buton : courbe de flambement (A_g = 65.7 cm², r = 7.40 cm, L_c = 6.00 m)

$$\frac{L_c}{r} = \frac{600}{7.40} = 81.1 \;\leq 4.71\sqrt{E/F_y} = 127$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{(L_c/r)^2} = \frac{\pi^2(200\,000)}{(81.1)^2} = 300.3\ \text{MPa}$$

$$F_{cr} = 0.658^{275/300.3}(275) = 187.4\ \text{MPa}$$

$$P_n = F_{cr}A_g = 187.4 \times 6\,570\ \text{mm}^2 = \mathbf{1{,}231.5}\ \text{kN}$$

Pour le buton : **résistance nominale P_n = 1,231.5 kN** ; élancement L_c/r = 81.1, dans le domaine du flambement inélastique (limite 127).

Solution (2/2)

SOLUTION

2 Ratios LRFD et ASD (P = 277.47 kN)

$$\text{LRFD: } P_u = 1.6(277.47) = 444.0\ \text{kN} \leq \phi_c P_n = 0.90(1{,}231.5) = 1{,}108.3\ \text{kN} \quad \eta = \mathbf{0.401}$$

$$\text{ASD: } P_a = 277.47\ \text{kN} \leq \frac{P_n}{\Omega_c} = \frac{1{,}231.5}{1.67} = 737.4\ \text{kN} \quad \eta = \mathbf{0.376}$$

Buton : LRFD η = **0.401**, ASD η = **0.376**. Rideau de palplanches (LRFD) 0.291, lierne 0.673 ; selon l'EN 1993-1-1, on avait 0.221, 0.511 et 0.358.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

L'argile sous-jacente porte, les couches latérales induisent cisaillement et charge

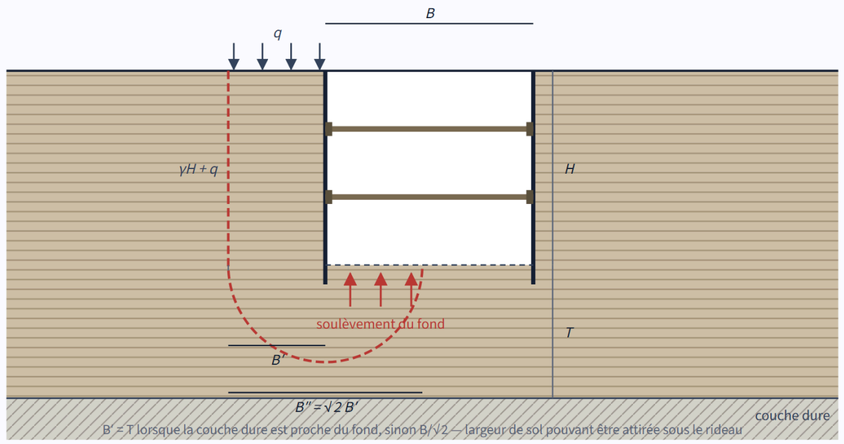
THÉORIE

Le fond de fouille, dans l'argile, peut se soulever sous le poids du sol adjacent (colonne de Terzaghi, correction de Chang). La formule est établie pour une argile homogène ; le module l'utilise **dans un profil stratifié grâce à l'extension GeoTerva** :

$$FS = \frac{5.14\,c\left(1 + 0.2\frac{B''}{L}\right) + \frac{c_{side} H}{B'}}{\sigma_v(H) + q} \qquad B' = \min\left(T, \frac{B}{\sqrt{2}}\right),\ B'' = \sqrt{2}\,B'$$

c : argile située sous la base (terme de portance) ; **c_{side}** : cohésion moyenne sur la hauteur soutenue (le sable est pris égal à zéro ; terme de cisaillement latéral) ; **$\sigma_v(H)$** : contrainte verticale totale des terres au niveau de la base, en bordure de fouille ($\Sigma\gamma_i H_i$).

B largeur de la fouille, L longueur en plan, T couche raide sous le fond de fouille ; la fiche du rideau n'est pas prise en compte (côté sécurité). FS exigé **≈ 1.5**.



Énoncé

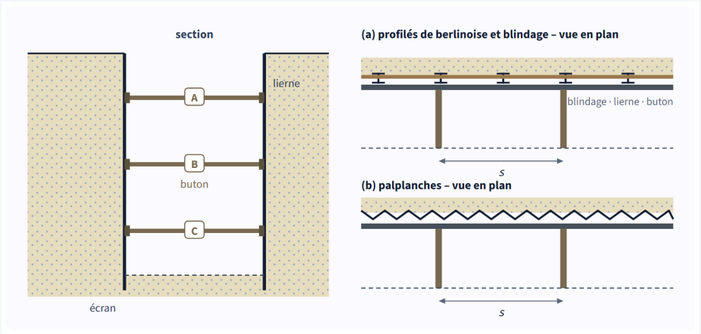
EXEMPLE

Données

Fouille à ciel ouvert	$H = 7$ **m,** $B = 6$ **m,** $L = 20$ **m, argile** $T = 4$ **m sous le fond de fouille ; en haut, 3 m de sable (**$\gamma = 17$**), en dessous, argile (**$\gamma = 18$**,** $c = 35$ **kPa)**
Comparaison	**si le sable avait 5 m d'épaisseur (argile 2 m)**

À DÉTERMINER

c_{side}, $\sigma_v(H)$, B' et **FS** (≥ 1.5 ?) ; FS lorsque l'épaisseur de sable augmente ?



Solution

SOLUTION

1 À partir des couches adjacentes : cohésion moyenne et contrainte des terres sus-jacentes

$$c_{side} = \frac{0\,(3) + 35\,(4)}{7} = \mathbf{20.0}\ \text{kPa}\ \ \text{(sable zéro)} \qquad \sigma_v(H) = 17(3) + 18(4) = \mathbf{123}\ \text{kPa}$$

$$B/\sqrt{2} = 4.24\ \text{m} > T = 4\ \text{m} \ \Rightarrow\ B' = 4.00\ \text{m}, \quad B'' = \sqrt{2}B' = 5.66\ \text{m}$$

2 Coefficient de sécurité (terme de portance : argile sous la base c = 35 kPa)

$$FS = \frac{5.14(35)\left(1 + 0.2\frac{5.66}{20}\right) + \frac{20(7)}{4.00}}{123} = \frac{190.1 + 35.0}{123} = \mathbf{1.83}\ \geq 1.5\ \checkmark$$

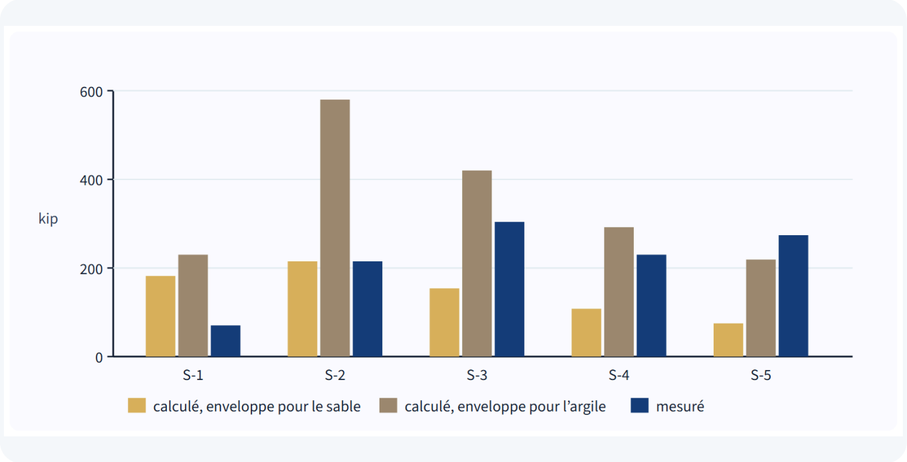
Le coefficient de sécurité vis-à-vis du soulèvement du fond de fouille est de **1.83** (≥ 1.5). Lorsque le sable atteint 5 m, la cohésion latérale tombe à 10 kPa, la contrainte due aux terres sus-jacentes descend à 121 kPa et FS tombe à **1.72** : à mesure que la couche de sable s'épaissit, la part du cisaillement latéral diminue.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Études de cas de Boston et Chicago

THÉORIE

Boston (section d'essai B) : 17.7 m de profondeur, cinq butons ; le profil a été encadré par deux enveloppes, l'une pour le sable et l'autre pour l'argile (enveloppe du sable : 53.5 kPa ; enveloppe de l'argile molle à moyenne : 146.1 kPa) ; les efforts mesurés se sont révélés très différents des deux estimations, et les butons avaient été dimensionnés pour des efforts très supérieurs à ceux mesurés. **Chicago, National Plaza** : 21.3 m de profondeur, six butons ; le profil a été ramené à une argile équivalente (c_{av} = 34.91 kPa, γ_{av} = 19.76 kN/m³, γH/c = 12.08, σ_a = 282.0 kPa). L'enveloppe de Peck a fourni une pression d'environ **1.8 fois** la pression observée : une enveloppe tracée autour de nombreuses fouilles est prudente pour une fouille isolée ; dans un même sol, l'expérience acquise sur le terrain peut réduire sensiblement le surdimensionnement.



Ce que la méthode admet

THÉORIE

Les enveloppes ont été établies à partir de fouilles de plus de 6 m de profondeur environ ; **l'enveloppe n'est pas la pression réelle sur le mur à un instant donné** : elle fournit une charge d'étaiement sûre, et non le déplacement du mur. L'argile est non drainée, le sable est drainé.

Le profil sable + argile est converti en **une seule argile équivalente** (c_{av}, γ_a) ; l'enveloppe est choisie d'après $\gamma_a H/c_{av}$. Plusieurs argiles sont d'abord moyennées en fonction de l'épaisseur. $K_s \approx 1$ et $n' = 0.75$ sont des valeurs moyennes ; une variation de $n' = 0.5–1.0$ a une forte influence sur le résultat.

La surcharge est ajoutée séparément ($\Delta p = q$) ; l'eau ne modifie que le poids volumique. Le **rideau de palplanches** est une chaîne de poutres isostatiques articulées ; les **liernes** sont des travées simples entre butons. L'acier est vérifié selon l'EN 1993-1-1 (classe 4 non dimensionnée) ou l'AISC 360-22.

Le soulèvement du fond de fouille est vérifié avec l'extension multicouche de GeoTerva de la formule établie pour une argile homogène ; la fiche du rideau n'est pas prise en compte.

Pendant l'excavation, un déplacement latéral et une perte de terrain aux abords sont à prévoir ; en présence d'une couche dure, les palplanches y sont fichées.

Synthèse

Points à retenir

Argile équivalente : $c_{av} = [\gamma_s K_s H_s^2 \tan \varphi'_s + (H - H_s) n' q_u]/(2H)$, $\gamma_a = [\gamma_s H_s + (H - H_s)\gamma_c]/H$; dans l'exemple 21.31 kPa et 17.57 kN/m³

Enveloppe : $\gamma_a H/c_{av} = 5.77 > 4 \rightarrow$ enveloppe d'argile molle à moyenne $\sigma_a = \gamma_a H[1 - 4c_{av}/\gamma_a H] = 37.75$ kPa ; $n' = 0.5 \rightarrow 57.75$ kPa

National Plaza : $c_{av,arg} = 51.16$, $c_{av} = 34.91$ kPa, $\gamma_{av} = 19.76$ kN/m³, $\gamma H/c = 12.08 \rightarrow \sigma_a = 282.0$ kPa (≈ 1.8 fois la valeur observée)

Effort dans les butons et dimensionnement : $P_{max} = 277.47$ kN ; rideau de palplanches $M_{max} = 26.99$ kN·m/m ; lierne M = 104.05 kN·m

Acier : EN 1993-1-1 η = 0.221 / 0.511 / 0.358 ; AISC LRFD buton 0.401, ASD 0.376

Soulèvement du fond de fouille (sol stratifié) : $c_{side} = 20$ kPa, $\sigma_v(H) = 123$ kPa, FS = 1.83 ≥ 1.5

Références bibliographiques

Das, B.M. (2016). Principles of Foundation Engineering, 8th ed. Cengage Learning — chapitre 15, « Braced Cuts » ; la présente page le suit.

Peck, R.B. (1943). Earth pressure measurements in open cuts, Chicago (Ill.) subway. Transactions, ASCE, 108, 1008–1058.

Peck, R.B. (1969). Deep excavation and tunneling in soft ground. Proceedings, 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, State-of-the-Art Volume, 225–290.

Terzaghi, K. (1943). Theoretical Soil Mechanics. Wiley, New York.

Lambe, T.W. (1970). Braced excavations. Proceedings, Specialty Conference on Lateral Stresses in the Ground and Design of Earth-Retaining Structures, ASCE, 149–218.

Swatek, E.P., Asrow, S.P. and Seitz, A. (1972). Performance of bracing for deep Chicago excavation. Proceedings, Specialty Conference on Performance of Earth and Earth-Supported Structures, ASCE, Vol. 1, Part 2, 1303–1322.

Bjerrum, L. and Eide, O. (1956). Stability of strutted excavations in clay. Géotechnique, 6(1), 32–47.

Chang, M.F. (2000). Basal stability analysis of braced cuts in clay. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 126(3), 276–279.

U.S. Department of the Navy (1971). Design Manual — Soil Mechanics, Foundations, and Earth Structures, NAVFAC DM-7, Washington, D.C.

Moormann, C. (2004). Analysis of wall and ground movements due to deep excavations in soft soil based on a new worldwide database. Soils and Foundations, 44(1), 87–98.

EN 1990:2002, Eurocode — Basis of structural design. CEN.

EN 1993-1-1:2005, Eurocode 3: Design of steel structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN.

EN 1993-5:2007, Eurocode 3: Design of steel structures — Part 5: Piling. CEN.

ANSI/AISC 360-22, Specification for Structural Steel Buildings. American Institute of Steel Construction, Chicago, 2022.

ASCE/SEI 7-22, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers, Reston, 2022.

REMARQUE

L'ensemble des exemples numériques a été produit avec le moteur de calcul propre au module ; le module donne les mêmes valeurs. Les exemples de calcul de la page du module sont le cas du National Plaza (Chicago) et la fouille d'ouverture du module (H = 7 m, sable 3 m + argile).

GeoTerva

Calculs géotechniques en ligne

De la théorie à la pratique

Renseigner dans GeoTerva les couches de sable et d'argile de la fouille étudiée, les niveaux de butons, la surcharge et les éléments ; le module fournit ensemble l'argile équivalente, l'enveloppe, les efforts dans les butons, les moments dans le rideau de palplanches et dans les liernes, la vérification de l'acier et le soulèvement du fond de fouille.

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