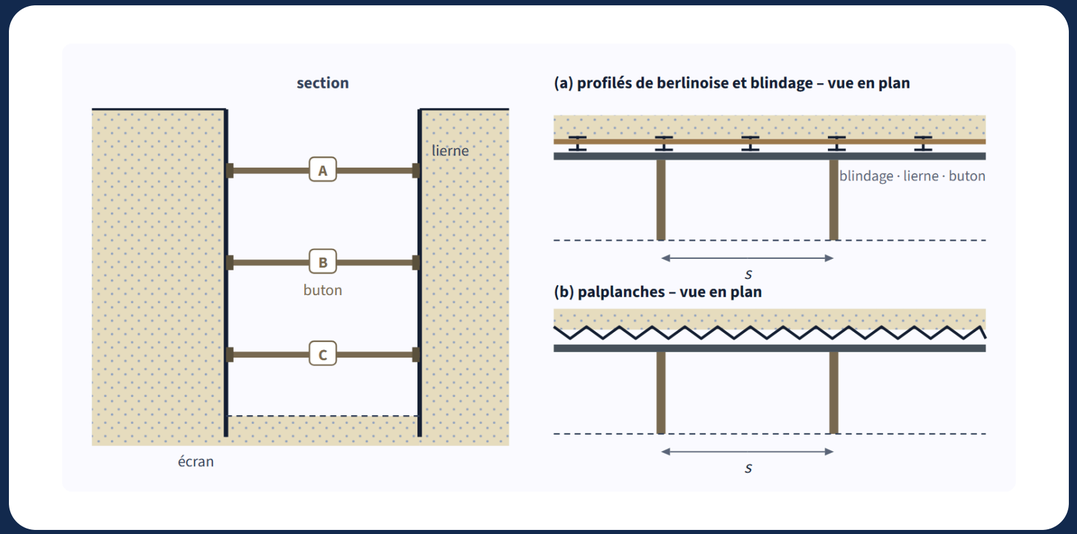
Présentation de cours de géotechnique · Rideaux de palplanches et fouilles étayées

Fouille étayée dans l'argile

Cours : fouille étayée (butonnée) dans l'argile ; enveloppes de pression pour l'argile, fissure de traction, 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.

- Étaiement de la fouille
- Enveloppe de Peck (argile)
- Fissure de traction · premier buton
- Buton · lierne · palplanche
- Soulèvement du fond de fouille



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 à partir des charges mesurées

Les deux enveloppes de l'argile selon le **nombre de stabilité γH/c** : argile molle à moyenne (γH/c > 4) et argile raide (≤ 4)

L'ajout de la **surcharge** comme pression distincte ; le fait que, dans l'argile, l'eau ne modifie que le poids volumique ; la **fissure de traction $z_c = 2c/\gamma$** et le premier niveau de butons

À partir de l'enveloppe : les **efforts dans les butons** (tronçons articulés) et le dimensionnement du **rideau de palplanches** et de la **lierne**

Vérifier l'acier selon **EN 1993-1-1 et AISC 360-22**

Vérifier le **soulèvement du fond de fouille** dans l'argile (colonne de Terzaghi, correction de Chang)

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 : argile (γ = 18 kN/m³, c = 35 kPa, φ = 0), profondeur H = 7.00 m, largeur B = 6.00 m ; butons à 1.00 · 3.50 · 6.00 m de profondeur, 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

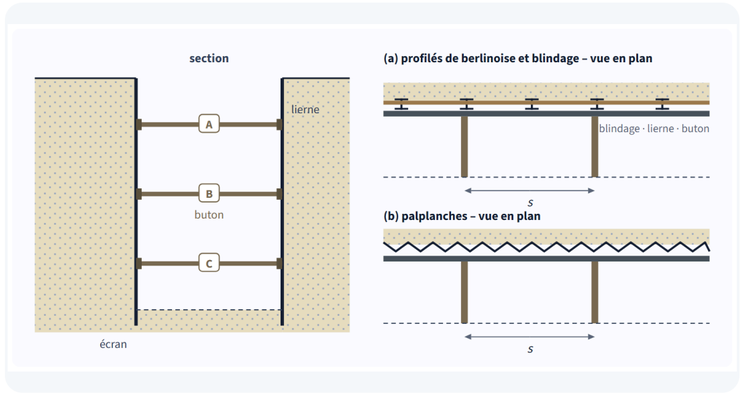
Les fouilles profondes à parois verticales (sous-sols en site urbain, tunnels en tranchée couverte) sont maintenues ouvertes par un **système de soutènement** provisoire. Deux dispositions sont courantes : entre des **profilés verticaux** (en acier ou en bois) battus au préalable, un blindage horizontal 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

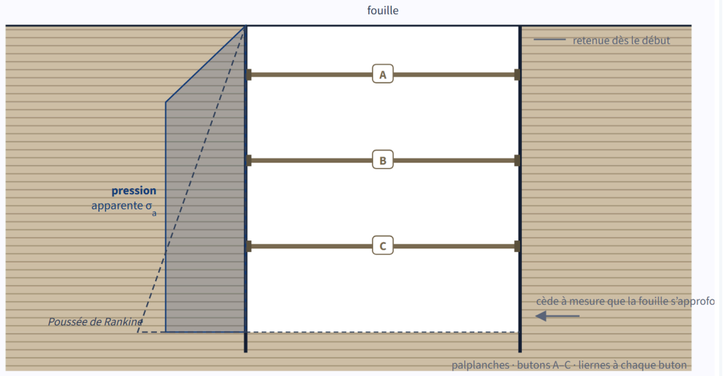
Un mur de soutènement en T renversé tourne autour de sa base, et la poussée active de Rankine (nulle en haut, maximale en bas) le décrit bien. **Une paroi étayée se déplace en sens inverse** : le premier buton est posé lorsque la fouille est peu profonde, de sorte que la partie supérieure ne bouge presque 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

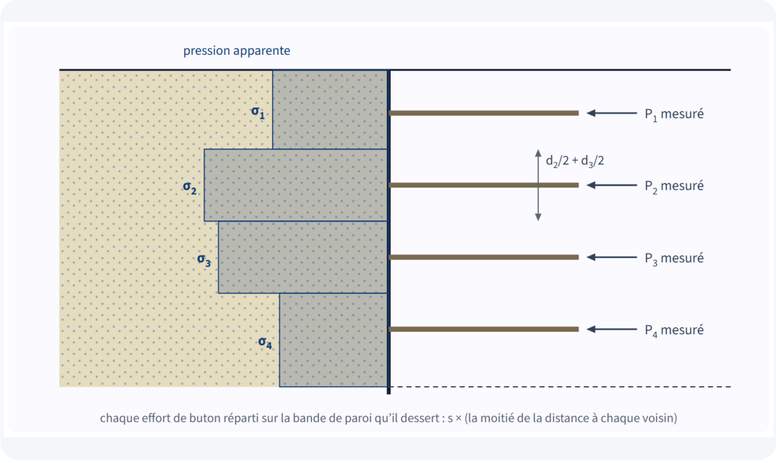
La pression varie d'un point à l'autre et chaque buton doit être dimensionné pour la **charge maximale** qu'il peut rencontrer. Des enveloppes sont construites à cet effet : dans une fouille instrumentée, la charge de chaque buton est mesurée, divisée par la bande de paroi qu'il soutient (espacement 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 déterminée 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 :

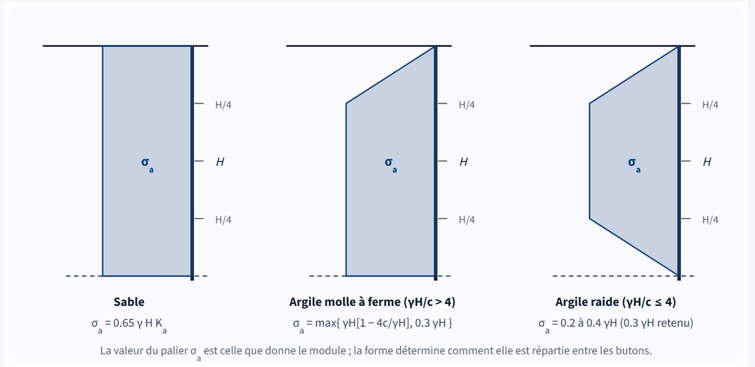
$$\frac{\gamma H}{c} > 4 : \quad \sigma_a = \max\left(\gamma H \left[1 - \frac{4c}{\gamma H}\right],\ 0.3\gamma H\right)$$

L'enveloppe est nulle en surface, croît linéairement dans le quart supérieur et reste constante jusqu'à la base ; la plus grande des deux expressions est déterminante. L'**argile raide** est plus proche de son domaine élastique :

$$\frac{\gamma H}{c} \leq 4 : \quad \sigma_a = 0.2\gamma H \text{ avec } 0.4\gamma H \ \ (\text{moyenne } 0.3\gamma H)$$

Dans l'argile raide, l'enveloppe croît sur le quart supérieur, est constante sur la moitié centrale et retombe à zéro sur le quart inférieur. Les conditions sont les mêmes que pour l'enveloppe du sable (profondeur ≳ 6 m, nappe sous le fond de fouille, argile non drainée).

Si la fouille traverse plusieurs argiles, la source en fait la moyenne pondérée par l'épaisseur : $c_{av} = \Sigma c_i H_i / H$, $\gamma_{av} = \Sigma \gamma_i H_i / H$, puis les enveloppes d'argile sont utilisées avec les moyennes.



Énoncé

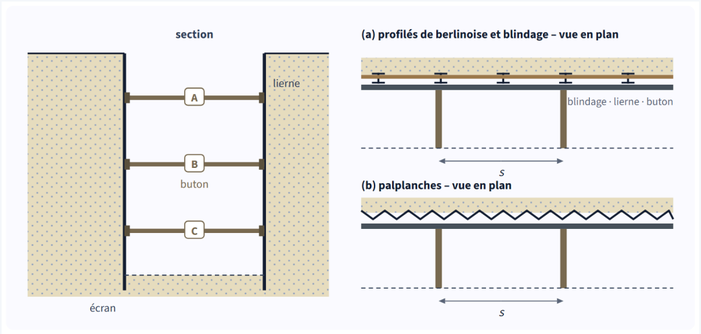
EXEMPLE

Données

Fouille à ciel ouvert	$H = 7.0$ **m,** $\gamma = 18$ **kN/m³,** $c = 35$ **kPa**
Argile plus molle	**même fouille,** $c = 20$ **kPa**

À DÉTERMINER

Pour les deux argiles, **γH/c**, le type d'enveloppe et σ_a.



Solution

SOLUTION

1 Argile d'ouverture (c = 35 kPa)

$$\frac{\gamma H}{c} = \frac{18(7)}{35} = \mathbf{3.60} \leq 4 \Rightarrow \text{argile raide}$$

$$\sigma_a = 0.3\gamma H = 0.3(18)(7) = \mathbf{37.80}\ \text{kPa}$$

2 Argile plus molle (c = 20 kPa)

$$\frac{\gamma H}{c} = \frac{126}{20} = \mathbf{6.30} > 4 \Rightarrow \text{argile molle à moyenne}$$

$$\sigma_a = \gamma H\left[1 - \frac{4c}{\gamma H}\right] = 126(1 - 0.635) = \mathbf{46.00}\ \text{kPa} \geq 0.3\gamma H = 37.8$$

L'argile du cas initial est considérée comme raide : σ_a = **37.80 kPa** (effort maximal dans les butons P = 271.3 kN). Lorsque la cohésion tombe à 20 kPa, la fouille passe à un comportement d'argile molle à moyenne : σ_a = **46.0 kPa** et la base de l'enveloppe devient un palier constant (P = 338.1 kN).

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

À côté de l'enveloppe ; avec le poids volumique ; position du premier buton

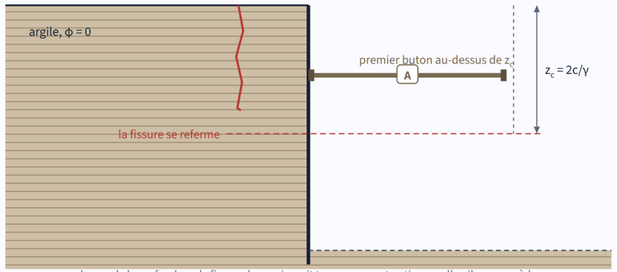
THÉORIE

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 ; la seule chose qu'elle modifie est 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 $\gamma = (\gamma z_w + \gamma_{sat}(H - z_w))/H$.

Fissure de traction : la face d'argile peut rester non soutenue jusqu'à la profondeur à laquelle la fissure de traction se referme (profondeur où la poussée active de Rankine avec cohésion s'annule). Pour $\varphi = 0$, $K_a = 1$; le premier appui doit être placé **au-dessus** de cette profondeur, afin que l'écran ne prenne pas appui sur une face ouverte que l'argile ne peut pas tenir.

$$\Delta p_q = q \qquad z_c = \frac{2c}{\gamma}\ (q = 0), \qquad z_c = \frac{2c - q}{\gamma}\ (\text{surcharge q})$$



Énoncé

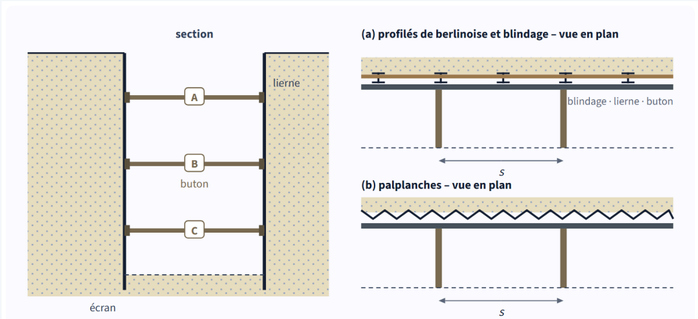
EXEMPLE

Données

Fouille	**Fouille ouverte de l'exemple 1 ($H = 7$ m, $\gamma = 18$, $\gamma_{sat} = 19$ kN/m³, $c = 35$ kPa) ; premier buton à $z = 1.0$ m**
Cas	**(a) q = 0, pas d'eau ; (b) surcharge $q = 10$ kPa ; (c) nappe phréatique $z_w = 3$ m**

À DÉTERMINER

z_c, la position du premier buton est-elle appropriée ? ; en (c), $\bar{\gamma}$ et $\bar{\gamma}H/c$; dans chaque cas, charge totale R et effort maximal dans les butons.



Solution (1/2)

SOLUTION

1 Fissure de traction et premier étaiement

$$z_c = \frac{2c}{\gamma} = \frac{2(35)}{18} = \mathbf{3.889}\ \mathrm{m}\ > 1.00\ \mathrm{m}\ \checkmark$$

$$z_c = \frac{2c - q}{\gamma} = \frac{70 - 10}{18} = 3.333\ \mathrm{m}\ \ (q = 10\ \mathrm{kPa})$$

Le premier appui (z = 1.0 m) se situe bien au-dessus de la profondeur de la fissure (3.89 m) : convenable. Avec la surcharge, la fissure se réduit à 3.33 m.

Solution (2/2)

SOLUTION

2 Eau (c) : $\bar{\gamma} = (\gamma z_w + \gamma_{sat}(H - z_w))/H$; synthèse des trois cas

$$\bar{\gamma} = \frac{18(3) + 19(4)}{7} = 18.571\ \mathrm{kN/m^3} \qquad \frac{\bar{\gamma} H}{c} = \frac{18.571(7)}{35} = 3.714$$

$$\sigma_a = 0.3\bar{\gamma} H = 39.00\ \mathrm{kPa}$$

État	γH/c	σ_a (kPa)	z_c (m)	R (kN/m)	P_{max} (kN)
(a) q = 0, sans eau	3.60	37.80	3.89	198.4	271.3
(b) q = 10 kPa	3.60	37.80	3.33	268.4	334.3
(c) eau z_w = 3 m	3.71	39.00	—	204.8	279.8

La surcharge n'ajoute que $\Delta p_q = q = 10$ kPa (R 198.4 → 268.4 kN/m) ; l'eau ne fait que porter $\bar{\gamma}$ à 18.57 kN/m³ (σ_a 37.8 → 39.0 kPa).

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 :

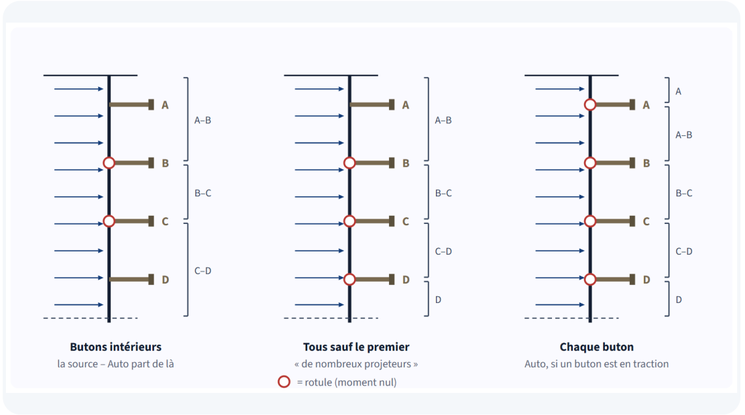
> Tracer l'enveloppe des pressions et les niveaux d'appui. Considérer le rideau de palplanches comme **articulé à chaque niveau d'appui**, à l'exception du plus haut et du plus bas (de nombreux projeteurs le font à tous les niveaux sauf le plus haut).

> 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

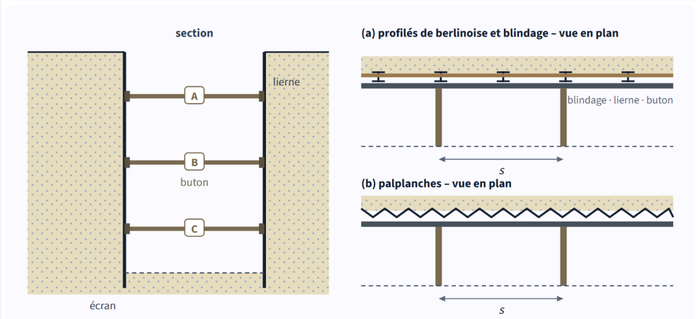
EXEMPLE

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 raide (γH/c = 3.6) : enveloppe trapézoïdale $\sigma_a = 0.3\gamma H = 37.8$ kPa (croît dans le quart supérieur, retombe à zéro dans le quart inférieur) ; rideau de palplanches articulé sur le 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	99.23	2.139	A (z = 1.00), B (z = 3.50)
2	3.50 – 7.00	99.23	4.861	B (z = 3.50), C (z = 6.00)

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

$$R_{B_2} = \frac{W(\bar{z} - z_A)}{z_B - z_A} = \frac{99.23(2.139 - 1.00)}{3.50 - 1.00} = \mathbf{45.20} \qquad R_A = W - R_{B_2} = \mathbf{54.02}\ \mathrm{kN/m}$$

La première travée porte les deux appuis avec 54.02 et 45.21 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

$$R_C = \frac{W(\bar{z} - z_B)}{z_C - z_B} = \frac{99.23(4.861 - 3.50)}{6.00 - 3.50} = \mathbf{54.02} \qquad R_{B_1} = W - R_C = \mathbf{45.20}\ \mathrm{kN/m}$$

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	54.02	54.02	**162.06**
B	3.50	45.21 + 45.21	90.42	**271.26**
C	6.00	54.02	54.02	**162.06**

L'effort maximal dans les appuis est **P_B = 271.26 kN** (niveau B) : 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.

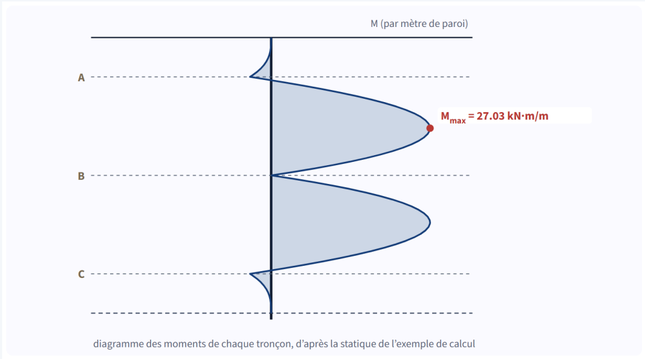
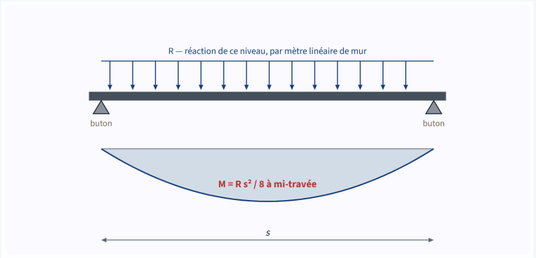


diagramme des moments de chaque tronçon, d'après la statique de l'exemple de calcul



Énoncé

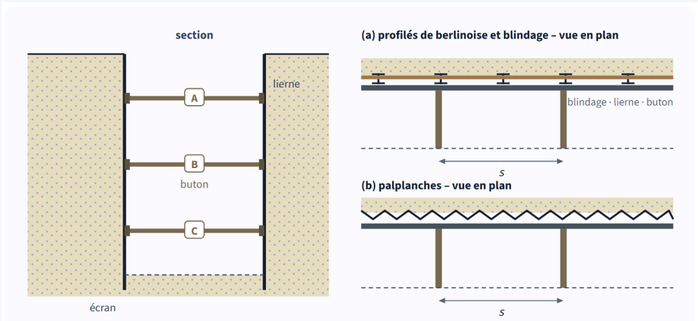
EXEMPLE

Données

Fouille	**La fouille de l'Exemple 1 ($H = 7$ m, argile raide, $\sigma_a = 37.8$ kPa) ; butons à 1.0 · 3.5 · 6.0 m ; entraxe horizontal $s = 3.0$ m ; articulation 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	27.03	2.30
2	3.50 – 7.00	27.03	4.70

2 Module de résistance requis

$$S = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}} = \frac{27.03}{170{,}000} = 0.0001590\ \mathrm{m^3/m} = \mathbf{159.0}\ \mathrm{cm^3/m}$$

Dans le rideau de palplanches : **M_{max} = 27.03 kN·m/m** (tronçon 1, z = 2.30 m) : **S ≥ 159.0 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	54.02	60.77	357
B	90.42	101.72	598
C	54.02	60.77	357

La réaction maximale se situe **au niveau B** (R = 90.42 kN/m) : la lierne est dimensionnée avec **M_{max} = 101.72 kN·m**, **S ≥ 598 cm³** ; les liernes des autres niveaux peuvent être plus petites.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Effets de calcul, classe, flexion et flambement

THÉORIE

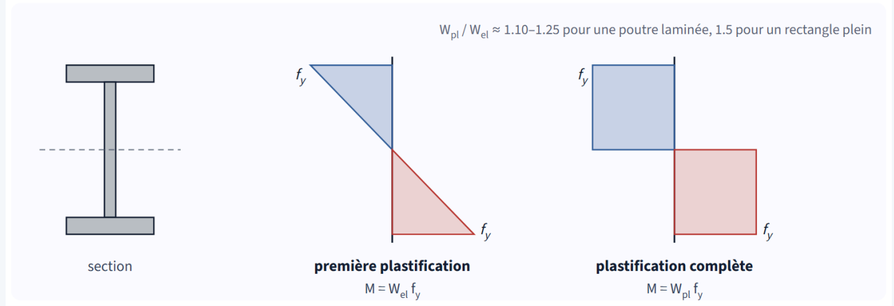
Les charges issues de l'enveloppe sont des **valeurs de service** (l'enveloppe de Peck est une borne supérieure des charges mesurées) ; elles sont portées une seule fois à la valeur de calcul : $E_d = \gamma_F E_k$. Chaque élément est vérifié avec la limite d'élasticité (f_y) de sa nuance d'acier ; la 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).

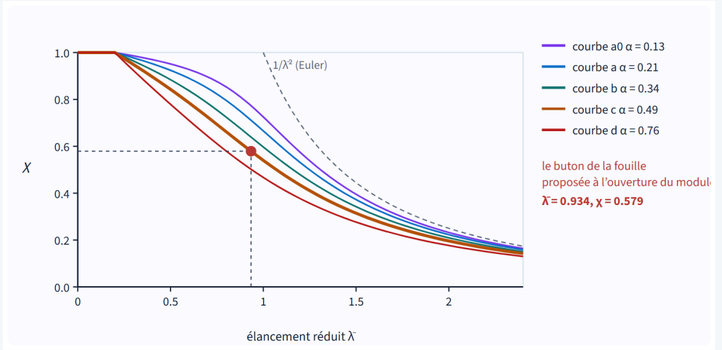
$$M_{c,Rd} = \frac{W f_y}{\gamma_{M0}} \qquad \eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \le 1 \qquad W = W_{pl}\ (\text{classe 1–2}),\ W_{el}\ (\text{classe 3})$$

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

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

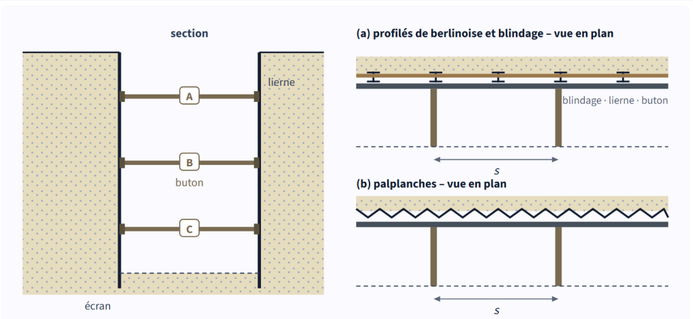
EXEMPLE

Données

Fouille et charges	**La fouille de l'exemple 1 et les charges de l'exemple 3 : $P_{max} = 271.26$ kN (buton B)**
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) : $\eta = \gamma_F M/(W f_y)$

$$\eta_{sp} = \frac{1.35(27.03)}{600 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{36.49}{165.0} = \mathbf{0.221}$$

$$\eta_{belt} = \frac{1.35(101.72)}{1\,000 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{137.33}{275.0} = \mathbf{0.499}$$

Palplanche η = **0.221**, lierne η = **0.499** : toutes deux sont suffisantes ($\eta \leq 1$).

Solution (2/2)

SOLUTION

2 Buton (flambement) : $N_{Ed} = 1.35\ P_{max} = 1.35(271.26) = 366.20$ 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} = 366.2 / 1,046.4 = **0.350**. Les trois éléments sont suffisants ($\eta \leq 1$) ; 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

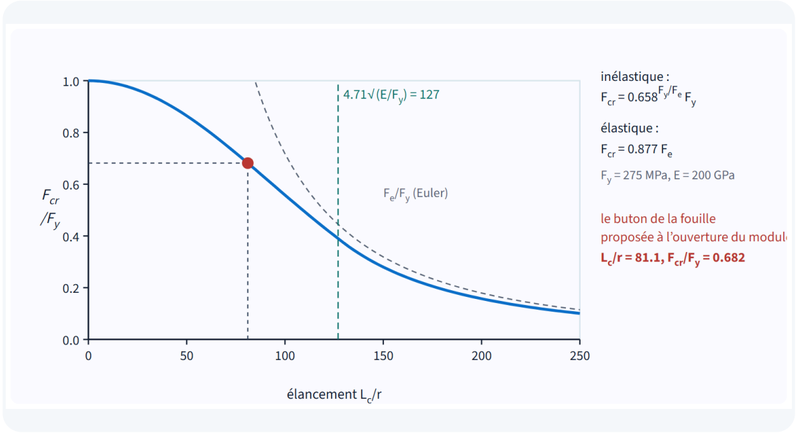
Chaque élément est vérifié avec la **résistance nominale R_n** déterminée à partir des dispositions relatives à la compression, à la flexion et au cisaillement. En LRFD, la charge est majorée et la résistance réduite par φ ; en ASD, la charge de service est comparée à la résistance divisée par le coefficient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

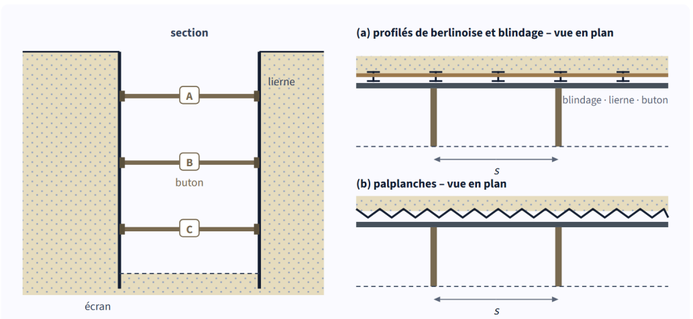
EXEMPLE

Données

Fouille et charges	**La fouille de l'exemple 1 et les charges de l'exemple 3 : $P_{max} = 271.26$ kN (buton B)**
Éléments	**Éléments de l'exemple 5 (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 = 271.26 kN)

$$\text{LRFD: } P_u = 1.6(271.26) = 434.0\ \text{kN} \leq \phi_c P_n = 0.90(1{,}231.5) = 1{,}108.3\ \text{kN} \quad \eta = \mathbf{0.392}$$

$$\text{ASD: } P_a = 271.26\ \text{kN} \leq \frac{P_n}{\Omega_c} = \frac{1{,}231.5}{1.67} = 737.4\ \text{kN} \quad \eta = \mathbf{0.368}$$

Buton : LRFD η = **0.392**, ASD η = **0.368**. Rideau de palplanches (LRFD) 0.291, lierne 0.658 ; selon l'EN 1993-1-1, on avait 0.221, 0.499 et 0.350.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Colonne de Terzaghi, correction de Chang

THÉORIE

Une fouille étayée peut se rompre sans même que les butons cèdent : le poids du terrain voisin de la fouille et de la surcharge refoule l'argile située sous le fond vers l'intérieur et vers le haut. La colonne de sol de largeur B′ repose, au niveau du fond, sur l'argile avec une capacité portante cN_c (N_c = 5.7) ; le cisaillement cH le long des faces latérales l'allège :

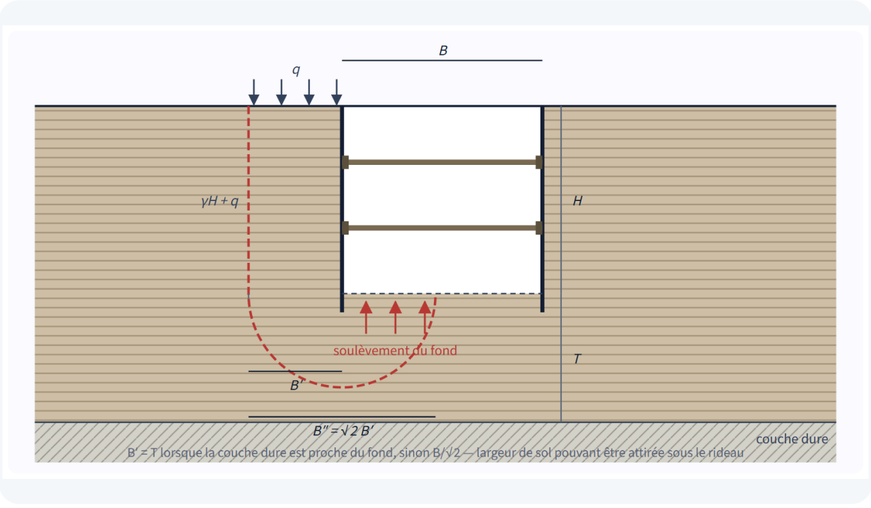
$$FS = \frac{cN_c}{\gamma H + q - cH/B'}$$

L'équation a été **corrigée sur trois points** : le cisaillement latéral ne réduit pas la charge, il **ajoute de la résistance** ; la bande de base de largeur B″ travaille comme une fondation chargée vers le haut ; le fond de fouille étant de largeur illimitée, N_c = 5.14 (fondation lisse) :

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

B largeur de la fouille, L longueur en plan, T épaisseur de l'argile sous le fond de fouille ; q surcharge à côté de la fouille. Dans les fouilles totalement effondrées, FS ≈ 1, tandis que dans les fouilles partiellement ou faiblement affectées par la rupture il est légèrement supérieur ; FS requis **≈ 1.5**.

Dans une argile homogène, si FS < 1.5, les palplanches sont battues plus profondément (en général pas plus de B/2 sous le fond de fouille) ; la partie enterrée reprend un effort tiré d'abaques de dimensionnement publiés.



Énoncé

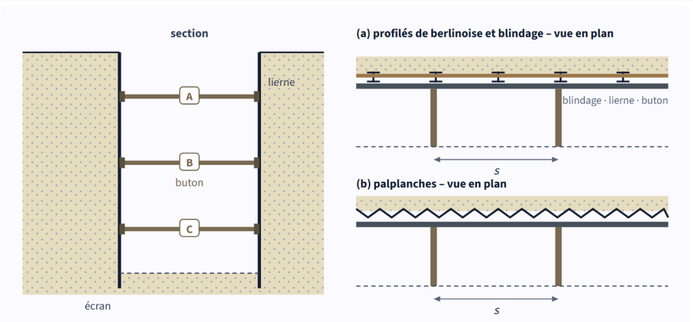
EXEMPLE

Données

Fouille à ciel ouvert	$H = 7$ m, $B = 6$ m, $L = 20$ m ; argile $\gamma = 18$, $c = 35$ kPa, épaisseur d'argile sous le fond $T = 4$ m ; sans surcharge
Fouille en tranchée ouverte	4 m de large, 15 m de long, 6 m de profondeur ; $\gamma = 17$, $c = 40$ kPa ; couche raide à 2 m sous la base

À DÉTERMINER

Pour les deux fouilles : **B′**, **B″** et **FS** (≥ 1.5 ?) ; pour la fouille initiale, sans couche dure et avec une largeur de 10 m ?



Solution

SOLUTION

1 Fouille à talus : B/√2 = 4.24 m > T = 4 m, donc B′ = T

$$B' = T = 4.00\ \text{m} \qquad B'' = \sqrt{2}B' = 5.66\ \text{m}$$

$$FS = \frac{5.14(35)\left(1 + 0.2\frac{5.66}{20}\right) + \frac{35(7)}{4.00}}{18(7)} = \frac{190.1 + 61.2}{126} = \mathbf{1.99} \geq 1.5\ \checkmark$$

2 Fouille de sous-sol (T = 2 m ≤ B/√2 = 2.83 m : B′ = T = 2.00 m, B″ = 2.83 m)

$$FS = \frac{5.14(40)\left(1 + 0.2\frac{2.83}{15}\right) + \frac{40(6)}{2.00}}{17(6)} = \mathbf{3.27}$$

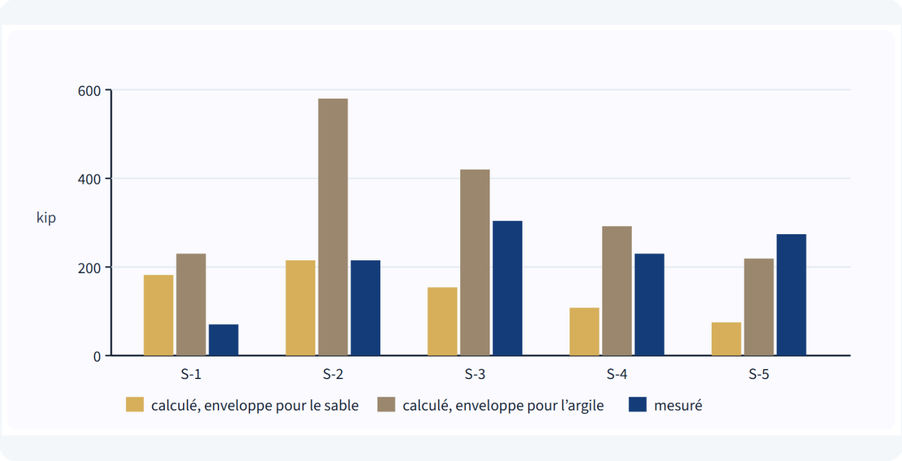
La fouille initiale donne **FS = 1.99**, la fouille du livre **3.27** : les deux valeurs sont ≥ 1.5. Si la couche raide n'est pas saisie (B′ = B/√2), FS de la fouille du livre tombe à 2.96 ; celui de la fouille initiale tombe à 1.80 pour une largeur de 10 m et en l'absence de couche raide (la diminution va dans le sens de la sécurité) : le soulèvement du fond de fouille se dégrade avec la largeur et en l'absence de couche raide.

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 (les paramètres du sol sont incertains), 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 > 4, 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 un effort de buton sûr, non le déplacement du mur. L'argile est **non drainée** ; la pression interstitielle n'est pas prise en compte séparément.

Lorsque plusieurs argiles sont présentes, leurs caractéristiques sont moyennées en fonction de l'épaisseur (c_{av}, γ_{av}) ; γH/c est déterminé avec ces moyennes. La surcharge est ajoutée à côté de l'enveloppe (Δp = q) ; l'eau ne modifie que le poids volumique.

Le **rideau de palplanches** est assimilé à une chaîne d'articulations discrètes ; sa rigidité propre et la fiche sous le fond de fouille ne sont pas utilisées. Les **liernes** sont des travées simples entre butons (hypothèse sécuritaire). L'acier est vérifié selon l'EN 1993-1-1 (la classe 4 n'est pas dimensionnée) ou selon l'AISC 360-22.

Le soulèvement du fond de fouille est vérifié à l'aide de l'équation corrigée de Chang ; la fiche du rideau de palplanches sous le fond de fouille n'est pas prise en compte (côté sécurité). Pour plusieurs couches, la formule est utilisée avec l'extension multicouche de GeoTerva.

Pendant les travaux, des mouvements latéraux et une perte de terrain aux abords sont à prévoir ; en présence d'une couche raide, les palplanches y sont encastrées. Dans l'argile molle, pour γH/c ≈ 8, de grands déplacements et la ruine des butons peuvent se produire.

Synthèse

Points à retenir

Enveloppe : $\gamma H/c > 4$ mou à moyen ($\sigma_a = \max(\gamma H[1 - 4c/\gamma H], 0.3\gamma H)$) ; ≤ 4 raide ($\approx 0.3\gamma H$). Exemple : $\gamma H/c = 3.6$, $\sigma_a = 37.8$ kPa

Surcharge et eau : $\Delta p = q$ est ajouté séparément ; l'eau ne modifie que $\bar{\gamma}$. **Fissure de traction** $z_c = 2c/\gamma = 3.89$ m ; le premier buton (1.0 m) se situe au-dessus

Effort dans les butons : l'enveloppe est découpée en parties aux rotules, les réactions sont obtenues par la statique ; dans l'exemple, $P_B = 271.26$ kN (somme des deux réactions)

Dimensionnement : palplanche $M_{max} = 27.03$ kN·m/m ($S = 159$ cm³/m), lierne $M = R\,s^2/8 = 101.72$ kN·m ($S = 598$ cm³ ; $\sigma_{adm} = 170$ MPa)

Acier : EN 1993-1-1 $\eta = 0.221 / 0.499 / 0.350$ (palplanche / lierne / buton) ; AISC LRFD buton 0.392, ASD 0.368

Soulèvement du fond de fouille : $FS = (5.14c(1 + 0.2B''/L) + cH/B')/(\gamma H + q) \geq 1.5$; 2.00 pour la fouille initiale, 3.27 pour la fouille du manuel

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. L'exemple de calcul de la page du module correspond également à cette fouille (H = 7 m, γ = 18 kN/m³, c = 35 kPa, butons à 1 · 3.5 · 6 m).

GeoTerva

Calculs géotechniques en ligne

De la théorie à la pratique

Renseigner dans GeoTerva le profil d'argile de la fouille étudiée, les niveaux de butons, la surcharge, l'eau et les éléments ; le module fournit ensemble l'enveloppe, la fissure de traction, 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 le module → **Page de théorie →**

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

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