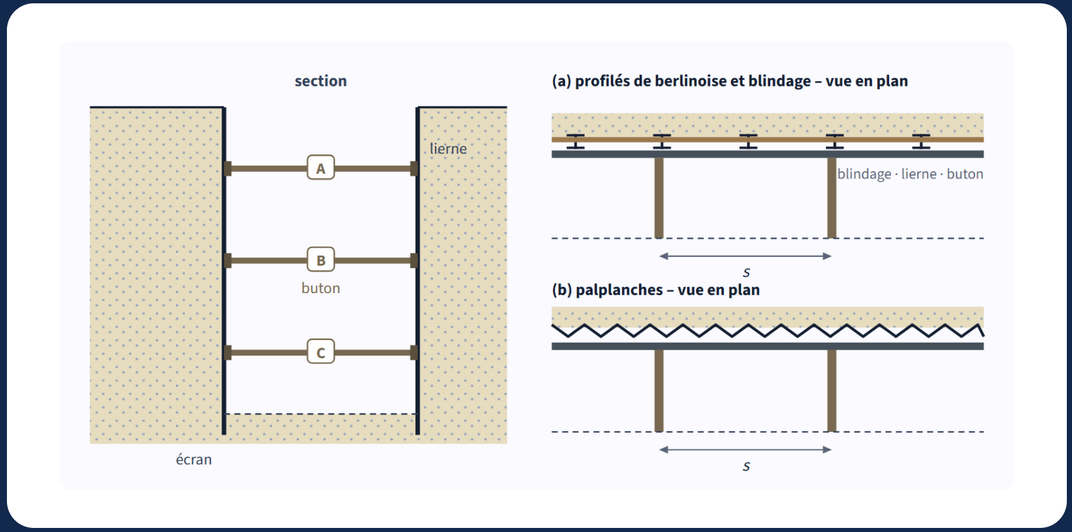
Présentation de cours de géotechnique · Rideaux de palplanches et fouilles étayées

Fouille étayée dans le sable

Cours : fouille étayée dans le sable ; enveloppe de pression de Peck, efforts dans les butons, dimensionnement du rideau de palplanches et des liernes, vérification de l'acier et renard hydraulique en fond de fouille ; un exemple de calcul pour chaque sujet.

- Soutènement de fouille
- Enveloppe de Peck (sable)
- Buton · lierne · palplanche
- EN 1993 · AISC 360
- Renard hydraulique en fond de fouille



Que verrons-nous dans ce cours ?

Pourquoi la pression dans une fouille étayée n'est **pas de type Rankine**, et comment les **enveloppes** sont établies à partir des efforts mesurés dans les butons

Pour le sable, l'**enveloppe de Peck $\sigma_a = 0.65\,\gamma\,H\,K_a$** et trois règles pour K_a en présence de plusieurs couches de sable

L'ajout de l'**eau** et de la **surcharge** sous forme de diagrammes distincts à côté de l'enveloppe

De l'enveloppe aux **efforts dans les butons** (tronçons articulés, réactions A, B_1, B_2, C, P = R·s)

Le dimensionnement du **rideau de palplanches** (M_{max}, S) et de la **lierne** ($M = R\,s^2/8$) ; la vérification de l'acier selon **EN 1993-1-1 et AISC 360-22**

Vérifier le **renard hydraulique** en fond de fouille dans le sable (gradient de sortie, $FS = i_{cr}/i_{sortie}$)

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 d'exemple : sable (γ = 17.6 kN/m³, φ' = 32°), profondeur H = 8.00 m, largeur B = 6.00 m ; butons aux profondeurs 1.80 · 4.60 · 7.30 m, espacement horizontal s = 3.00 m. Les efforts sont donnés par mètre de mur (charges des butons multipliées par s).

Système de soutènement et ses éléments

THÉORIE

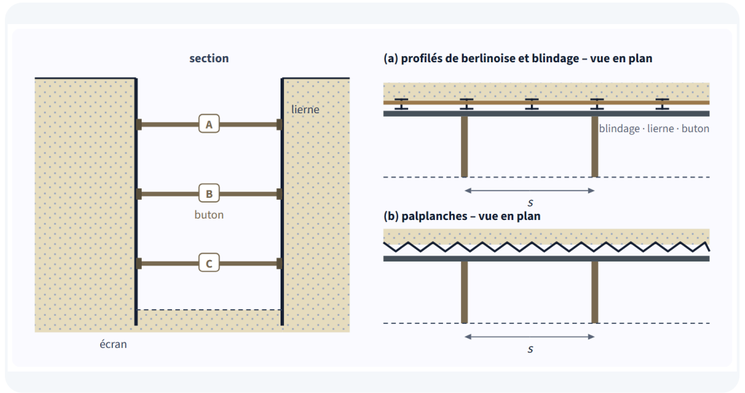
Les fouilles profondes à parois verticales (sous-sols en site urbain, tunnels en tranchée couverte) sont maintenues ouvertes par un **système de soutènement** provisoire. Deux dispositions sont courantes : entre des **profilés verticaux** (en acier ou en bois) battus au préalable, un blindage horizontal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

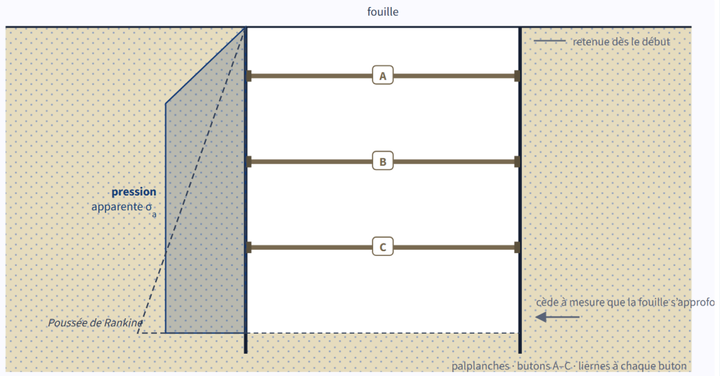
Un mur de soutènement en T renversé tourne autour de sa base, et la poussée active de Rankine (nulle en haut, maximale en bas) le décrit bien. **Une paroi étayée se déplace en sens inverse** : le premier buton est posé lorsque la fouille est peu profonde, de sorte que la partie supérieure ne bouge presque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

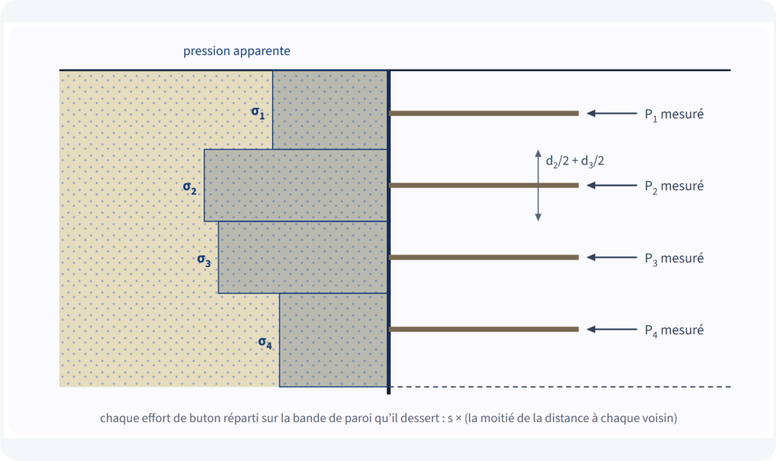
La pression varie d'un point à l'autre et chaque buton doit être dimensionné pour la **charge maximale** qu'il peut rencontrer. Des enveloppes sont construites à cet effet : dans une fouille instrumentée, la charge de chaque buton est mesurée, divisée par la bande de paroi qu'il soutient (espacement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



$\sigma_a = 0.65\,\gamma\,H\,K_a$, sur toute la hauteur

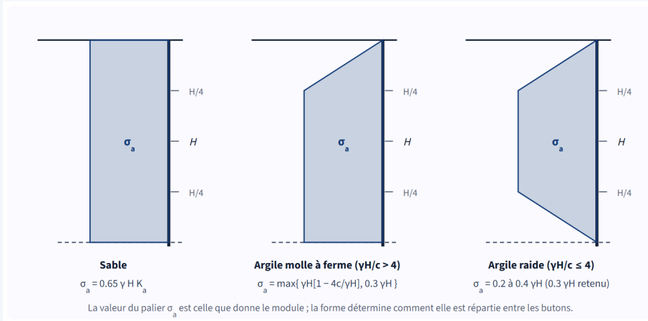
THÉORIE

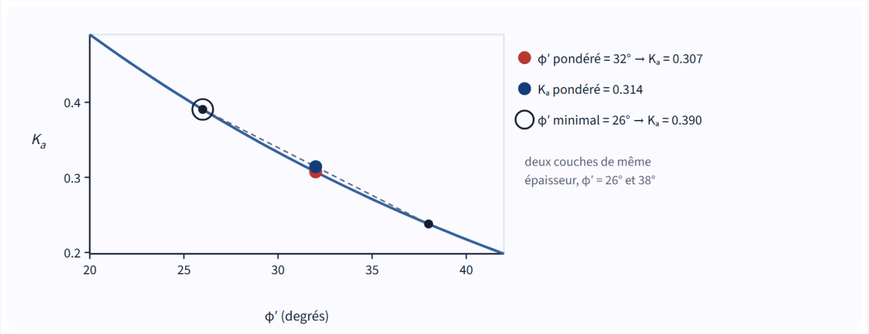
Dans le sable, l'enveloppe de Peck est un **rectangle** : une pression unique sur toute la hauteur de la fouille, égale à 65 % de l'ordonnée maximale du triangle de poussée de Rankine :

$$\sigma_a = 0.65\,\gamma H K_a \qquad K_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi'}{2}\right)$$

Les enveloppes s'appliquent dans les conditions suivantes : profondeur de fouille supérieure à environ 6 m ; **nappe phréatique sous le fond de fouille** ; sable drainé (pression interstitielle nulle).

L'enveloppe exige un seul K_a ; pour **plusieurs sables**, la source ne donne pas de règle. Trois règles sont utilisées et ne concordent pas, car K_a est une fonction convexe de φ' (la moyenne prise à l'intérieur de la courbe reste en dessous de la courbe) : $K_a(\bar{\varphi} = \Sigma\varphi H/H)$, la moyenne des $K_a = \Sigma K_{a,i} H/H$ et $K_a(\varphi'_{min})$.





Énoncé

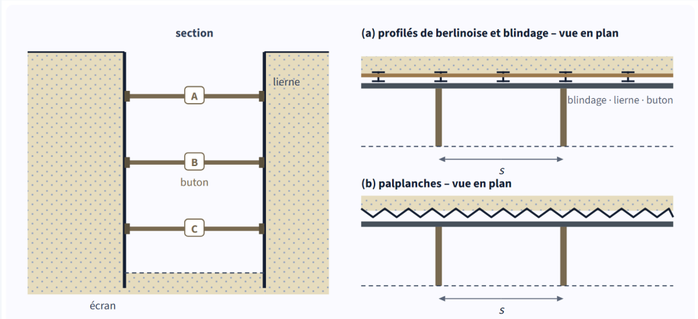
EXEMPLE

Données

Fouille	$H = 8.00$ **m, sable unique** $\gamma = 17.6$ **kN/m³,** $\varphi' = 32^\circ$
Profil à trois couches	**0–3 m :** $\gamma = 17$, $\varphi' = 28^\circ$ **; 3–6 m :** 18, 38° **; au-delà de 6 m :** 18.5, 33° **(même fouille)**

À DÉTERMINER

(a) **K_a** et **σ_a** ; (b) valeurs de K_a et de σ_a selon les trois règles pour le profil à trois couches.



Solution

SOLUTION

1 (a) Sable seul

$$K_a = \tan^2(45^\circ - 16^\circ) = \mathbf{0.3073}$$

$$\sigma_a = 0.65\,\gamma H K_a = 0.65(17.6)(8.00)(0.3073) = \mathbf{28.12}\ \mathrm{kPa}$$

2 (b) Trois couches : $\bar{\gamma}$ pondéré = 17.75 kN/m³ par rapport à la hauteur de fouille (épaisseurs des couches 3 + 3 + 2 m)

Règle	K_a	$\sigma_a = 0.65\,\bar{\gamma} H K_a$ (kPa)	P_{max} (kN)
$K_a(\bar{\varphi} = 33.0°)$	0.2948	27.21	308.5
K_a moyen = $\Sigma K_{a,i} H_i / H$	0.2983	27.53	312.1
$K_a(\varphi'_{min} = 28°)$	0.3610	33.32	377.7

Pour un sable unique, l'enveloppe vaut **28.12 kPa**. Les valeurs de K_a des trois règles varient entre 0.295 – 0.361 : le calcul avec le φ′ le plus faible (σ_a = 33.3 kPa) donne une valeur supérieure de 22 % à celles obtenues avec les moyennes ; les règles fondées sur une moyenne restent à l'intérieur de la courbe, et **la plus prudente est φ'_{min}**.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

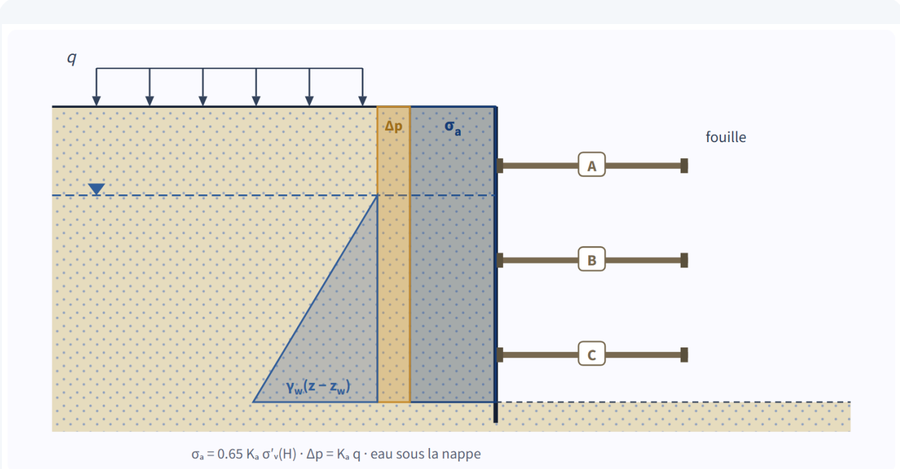
Ajouté à côté de l'enveloppe, pas à l'intérieur

THÉORIE

Les enveloppes sont établies à partir de fouilles où il n'y a ni eau sous le fond de fouille ni charge à côté de la fouille. Le module ajoute les deux sous forme de **diagrammes distincts** à côté de l'enveloppe ; l'enveloppe n'est pas extrapolée au-delà de l'intervalle dans lequel elle a été mesurée.

Eau : l'enveloppe de Peck pour le sable est un diagramme de contraintes effectives. Si l'eau se trouve dans la fouille, la contrainte verticale des terres au niveau du fond est prise effective (poids volumique naturel au-dessus de l'eau, déjaugé en dessous) ; l'eau s'exerce en outre sur la paroi sur toute la hauteur et les butons reprennent les deux ensemble.

La **surcharge q** n'est pas intégrée à l'enveloppe (le coefficient empirique 0.65 s'appliquerait aussi à elle) ; elle est reprise comme sa propre pression uniforme sur toute la hauteur.



$$\sigma'_v(H) = \sum \gamma_i h_i + \sum (\gamma_{sat,i} - \gamma_w) h_i \qquad \sigma_a = 0.65 K_a \sigma'_v(H) \qquad u(z) = \gamma_w (z - z_w)$$

$$\Delta p_q = K_a q \qquad R = \sigma_a H + \Delta p_q H + \tfrac{1}{2}\gamma_w (H - z_w)^2$$

Énoncé

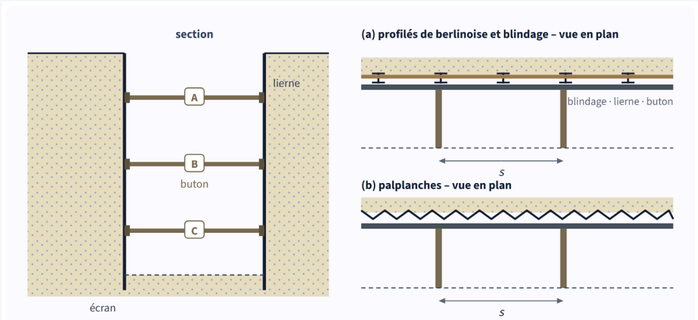
EXEMPLE

Données

Fouille	**La fouille de l'exemple 1(a) ($H = 8$ m, $\gamma = 17.6$, $\gamma_{sat} = 20$ kN/m³, $\varphi' = 32°$)**
Cas	**(a) sans eau, sans surcharge ; (b) nappe phréatique à $z_w = 3$ m ; (c) surcharge uniforme $q = 10$ kPa**

À DÉTERMINER

Dans chaque cas **σ_a**, surcharge et pression de l'eau ; **charge totale R** et plus grand effort dans un buton.



Solution (1/2)

SOLUTION

1 (b) Eau : contrainte verticale effective des terres et enveloppe ; l'eau agit en outre sur toute la hauteur

$$\sigma'_v(H) = 17.6(3) + (20 - 9.81)(5) = 103.75 \text{ kPa}$$

$$\sigma_a = 0.65(0.3073)(103.75) = 20.72 \text{ kPa}$$

$$R = \sigma_a H + \tfrac{1}{2}\gamma_w (H - z_w)^2 = 20.72(8) + \tfrac{1}{2}(9.81)(5)^2 = \mathbf{288.41} \text{ kN/m}$$

Sous l'eau, la contrainte verticale effective des terres diminue (σ_a 28.12 → 20.72 kPa), mais l'eau s'exerce sur le rideau sur toute la hauteur : R = **288.4 kN/m**.

Solution (2/2)

SOLUTION

2 (c) Surcharge : pression uniforme distincte ; synthèse de (a), (b), (c)

$$\Delta p_q = K_a q = 0.3073(10) = 3.073\ \text{kPa}$$

$$R = \sigma_a H + \Delta p_q H = 28.12(8) + 3.073(8) = 249.52\ \text{kN/m}$$

État	σ_a (kPa)	Ek (kPa)	R (kN/m)	P_{max} (kN)	M_{max} du rideau de palplanches (kN·m/m)
(a) Sans eau, q = 0	28.12	—	224.96	318.8	45.55
(b) Eau z_w = 3 m	20.72	u(H) = 49.05	288.38	376.7	37.09
(c) q = 10 kPa	28.12	Δp_q = 3.07	249.52	353.5	50.53

L'eau **réduit** l'enveloppe mais ajoute la pression de l'eau : R 225.0 → **288.4 kN/m**. La surcharge ne modifie pas l'enveloppe ; elle ajoute Δp_q = 3.07 kPa (R = 249.5 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 :

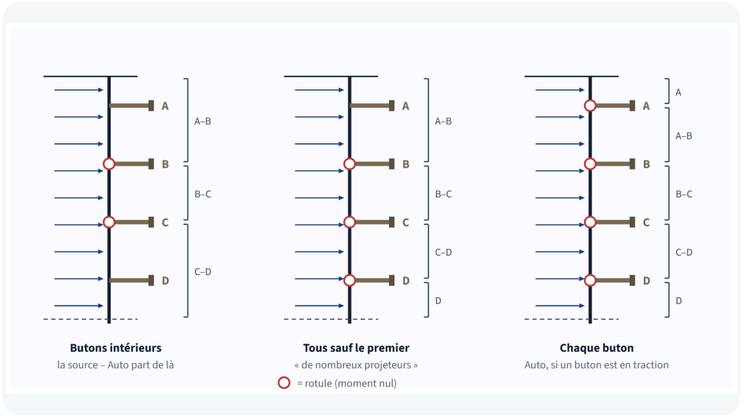
> Tracer l'enveloppe des pressions et les niveaux d'appui. Considérer le rideau de palplanches comme **articulé à chaque niveau d'appui**, à l'exception du plus haut et du plus bas (de nombreux projeteurs le font à tous les niveaux sauf le plus haut).

> 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

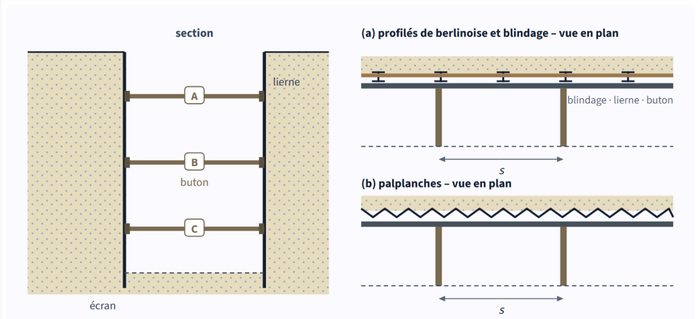
EXEMPLE

Données

Fouille	$H = 8.00$ m ; $B = 6$ m ; butons $z = 1.80, 4.60, 7.30$ m (A, B, C) ; espacement horizontal $s = 3.00$ m
Pression	Exemple 1(a) : enveloppe rectangulaire continue de $\sigma_a = 28.12$ kPa ; rideau de palplanches articulé au niveau de l'appui B (à l'exception de la partie la plus haute et de la plus basse)

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 – 4.60	129.35	2.300	A (z = 1.80), B (z = 4.60)
2	4.60 – 8.00	95.61	6.300	B (z = 4.60), C (z = 7.30)

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

$$R_{B_2} = \frac{W(\bar{z} - z_A)}{z_B - z_A} = \frac{129.35(2.300 - 1.80)}{4.60 - 1.80} = \mathbf{23.10} \qquad R_A = W - R_{B_2} = \mathbf{106.25}\ \mathrm{kN/m}$$

La première travée porte les deux appuis avec 106.25 et 23.10 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

$$R_C = \frac{W(\bar{z} - z_B)}{z_C - z_B} = \frac{95.61(6.300 - 4.60)}{7.30 - 4.60} = \mathbf{60.20} \qquad R_{B_1} = W - R_C = \mathbf{35.41}\ \mathrm{kN/m}$$

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	1.80	106.25	106.25	**318.75**
B	4.60	23.10 + 35.41	58.51	**175.53**
C	7.30	60.20	60.20	**180.60**

L'effort maximal dans les appuis est **P_A = 318.75 kN** (niveau A) : 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.

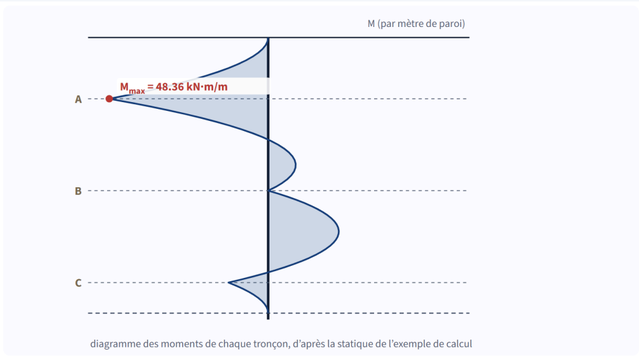
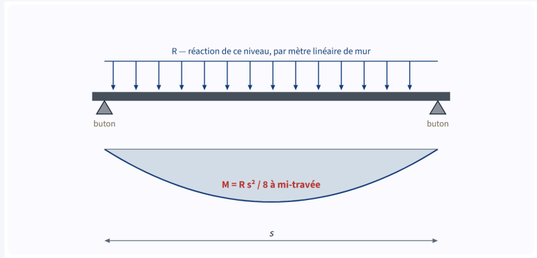


diagramme des moments de chaque tronçon, d'après la statique de l'exemple de calcul



Énoncé

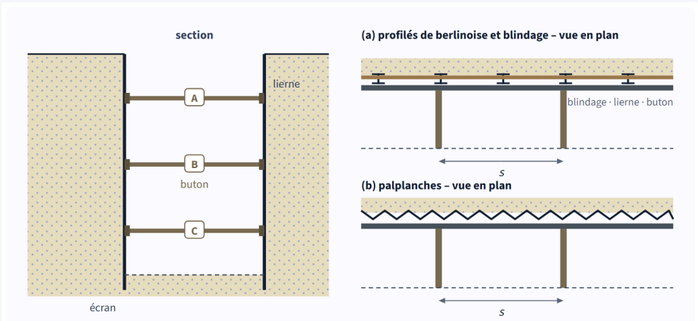
EXEMPLE

Données

Fouille	**profondeur $H = 27$ ft (8.23 m), sable $\gamma = 17.59$ kN/m³, $\varphi' = 32^\circ$; butons à 6, 15, 24 ft (1.83 ; 4.57 ; 7.32 m) ; espacement horizontal 12 ft (3.66 m) ; rotule en B**
Acier	**contrainte de flexion admissible $\sigma_{allow} = 165\,474$ 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 – 4.57	48.36	1.83
2	4.57 – 8.23	21.49	5.79

2 Module de résistance requis

$$S = \frac{M_{max}}{\sigma_{allow}} = \frac{48.36}{165{,}474} = 0.0002923\ \mathrm{m^3/m} = \mathbf{292.3}\ \mathrm{cm^3/m}$$

Dans le rideau de palplanches : **M_{max} = 48.36 kN·m/m** (tronçon 1, z = 1.83 m) : **S ≥ 292.3 cm³/m**.

Solution (2/2)

SOLUTION

3 Lierne : poutre simple à chaque niveau (s = 3.658 m)

Niveau	R (kN/m)	M = R s²/8 (kN·m)	S = M/σ_{adm} (cm³)
A	110.18	184.25	1,113
B	57.30	95.82	579
C	70.52	117.93	713

La réaction maximale se situe **au niveau A** (R = 110.18 kN/m) : la lierne est dimensionnée avec **M_{max} = 184.25 kN·m**, **S ≥ 1,113 cm³** ; les liernes des autres niveaux peuvent être plus petites.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Effets de calcul, classe, flexion et flambement

THÉORIE

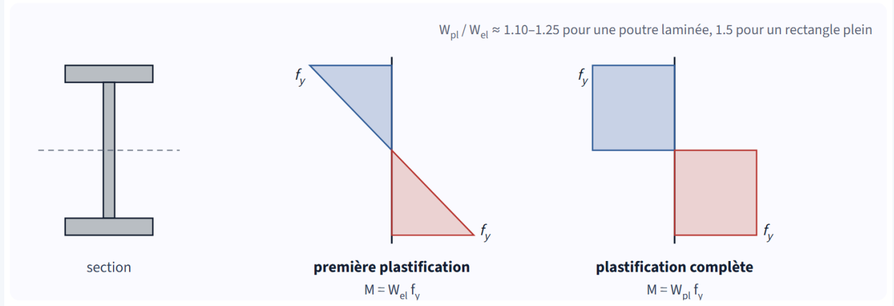
Les charges issues de l'enveloppe sont des **valeurs de service** (l'enveloppe de Peck est une borne supérieure des charges mesurées) ; elles sont portées une seule fois à la valeur de calcul : $E_d = \gamma_F E_k$. Chaque élément est vérifié avec la limite d'élasticité (f_y) de sa nuance d'acier ; la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

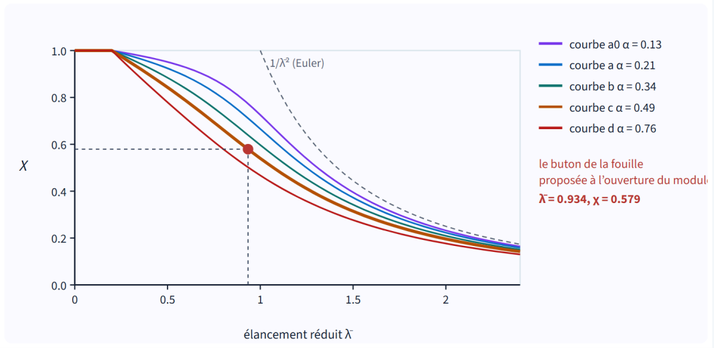
$$M_{c,Rd} = \frac{W f_y}{\gamma_{M0}} \qquad \eta = \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \le 1 \qquad W = W_{pl}\ (\text{classe 1–2}),\ W_{el}\ (\text{classe 3})$$

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

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

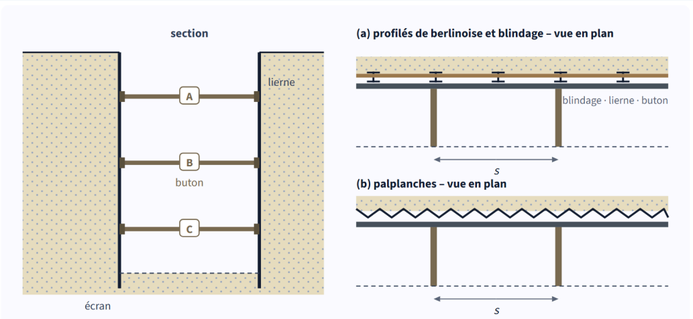
EXEMPLE

Données

Fouille et charges	**La fouille de l'exemple 1(a) et les charges de l'exemple 3 : $P_{max} = 318.75$ kN (buton A)**
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) : $\eta = \gamma_F M/(W f_y)$

$$\eta_{sp} = \frac{1.35(45.55)}{600 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{61.50}{165.0} = \mathbf{0.373}$$

$$\eta_{belt} = \frac{1.35(119.53)}{1\,000 \cdot 10^{-6}(275\,000)} = \frac{161.37}{275.0} = \mathbf{0.587}$$

Palplanche η = **0.373**, lierne η = **0.587** : toutes deux sont suffisantes (η ≤ 1).

Solution (2/2)

SOLUTION

2 Buton (flambement) : $N_{Ed} = 1.35\ P_{max} = 1.35(318.75) = 430.31$ 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} = 430.3 / 1,046.4 = **0.411**. 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

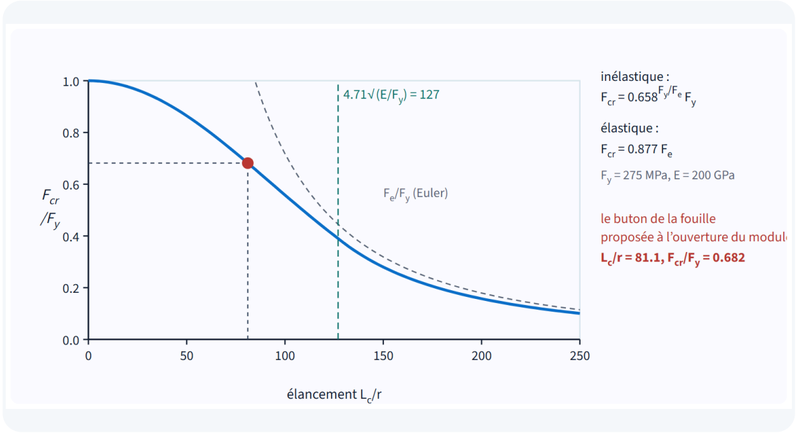
Chaque élément est vérifié avec la **résistance nominale R_n** déterminée à partir des dispositions relatives à la compression, à la flexion et au cisaillement. En LRFD, la charge est majorée et la résistance réduite par φ ; en ASD, la charge de service est comparée à la résistance divisée par le coefficient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

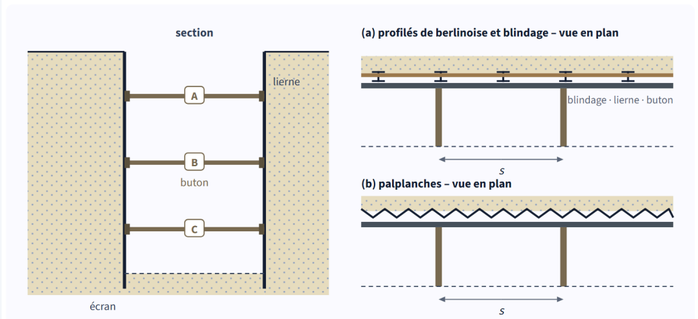
EXEMPLE

Données

Fouille et charges	**La fouille de l'exemple 1(a) et les charges de l'exemple 3 : $P_{max} = 318.75$ kN (buton A)**
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 = 318.75 kN)

$$\text{LRFD: } P_u = 1.6(318.75) = 510.0\ \text{kN} \leq \phi_c P_n = 0.90(1{,}231.5) = 1{,}108.3\ \text{kN} \quad \eta = \mathbf{0.460}$$

$$\text{ASD: } P_a = 318.75\ \text{kN} \leq \frac{P_n}{\Omega_c} = \frac{1{,}231.5}{1.67} = 737.4\ \text{kN} \quad \eta = \mathbf{0.432}$$

Buton : LRFD η = **0.460**, ASD η = **0.432**. Rideau de palplanches (LRFD) 0.491, lierne 0.773 ; selon l'EN 1993-1-1, on avait 0.373, 0.587 et 0.411.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Gradient de sortie et gradient critique

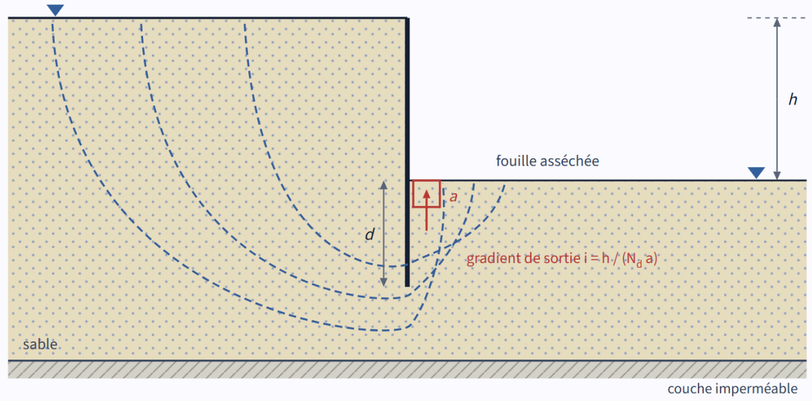
THÉORIE

Le fond en sable est généralement stable et le reste tant que l'eau à l'intérieur de la fouille ne se tient pas en dessous de la nappe extérieure. Lorsque la fouille est asséchée, l'eau passe sous l'écran et remonte à travers le fond ; le fort gradient ascendant au point de sortie peut soulever les grains : **le fond bouillonne (renard hydraulique)**. Le plus grand gradient de sortie le long de l'écran est lu sur le réseau d'écoulement :

$$i_{exit(max)} = \frac{h/N_d}{a} = \frac{h}{N_d\, a} \qquad FS = \frac{i_{cr}}{i_{exit(max)}} \qquad i_{cr} = \frac{G_s - 1}{1 + e}$$

h est la perte de charge dans le réseau d'écoulement, N_d le nombre de chutes de potentiel, a la longueur de l'élément d'écoulement par lequel l'eau sort du sol à côté du rideau. i_{cr} vaut 0.9–1.1 dans la plupart des sols (moyenne 1) ; FS requis ≈ **1.5**.

Pour une fouille blindée dans du sable profond, le gradient de sortie a été résolu théoriquement : à partir de deux abaques, le module m (avec $2L_2/B$ et $2L_1/B$) et $L_2\, i_{sortie}/h$ sont obtenus ; $i = (L_2 i/h)_{abaque} \cdot h/L_2$. L_1 est la profondeur du sable extérieur jusqu'au niveau du fond et L_2 la fiche de l'écran sous le fond.



Énoncé

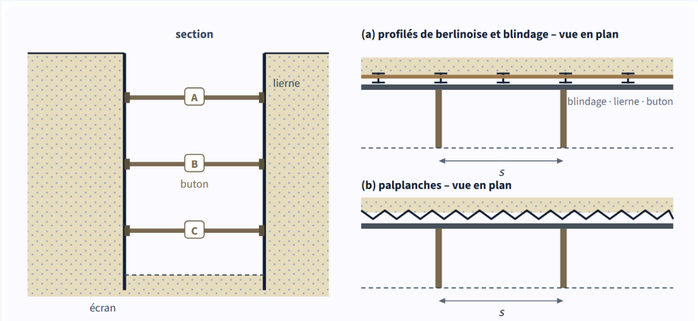
EXEMPLE

Données

Réseau d'écoulement (fouille d'ouverture)	**perte de charge $h = 3.0$ m, nombre de chutes $N_d = 8$, élément de sortie $a = 1.0$ m ; $i_{cr} = 1.0$; $FS_{required} = 1.5$**
Exemple d'abaque (ouvrage)	$h = 4.5$ m, $L_1 = 5$ m, $L_2 = 4$ m, $B = 5$ m: $2L_1/B = 2$, $B/2L_2 = 0.625$, $m \approx 0.033$, $L_2 i_{exit}/h = 0.54$

À DÉTERMINER

Par les deux méthodes, i_{sortie} et **FS** ; conclusion au regard de la valeur requise de 1.5.



Solution

SOLUTION

1 Réseau d'écoulement : $i_{sortie} = h/(N_d\, a)$

$$i_{exit(max)} = \frac{h}{N_d a} = \frac{3.0}{8(1.0)} = \mathbf{0.375}$$

$$FS = \frac{i_{cr}}{i_{exit(max)}} = \frac{1.0}{0.375} = \mathbf{2.67} \geq 1.5 \checkmark$$

2 Méthode par abaque (sable profond)

$$i_{exit(max)} = \left(\frac{L_2 i_{exit}}{h}\right)_{nomograph} \frac{h}{L_2} = 0.54 \cdot \frac{4.5}{4} = 0.6075$$

$$FS = \frac{1.0}{0.6075} = \mathbf{1.646} \geq 1.5 \checkmark$$

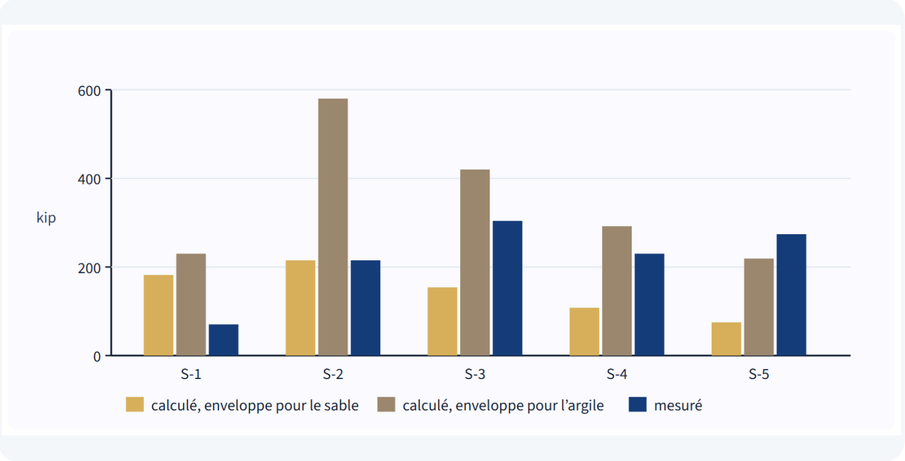
Avec le réseau d'écoulement, la sécurité vis-à-vis du renard hydraulique est de **2.67** ; avec l'abaque, de **1.65** : ces deux valeurs sont supérieures à la valeur requise de 1.5.

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 (espacés de 3.66 m) ; le profil a été encadré par deux enveloppes, l'une pour le sable et l'autre pour l'argile : enveloppe du sable de 53.5 kPa, enveloppe de l'argile molle à moyenne de 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, argiles sous 13 ft de remblai sableux ; le profil a été ramené à une argile équivalente : c_{av} = 34.91 kPa, γ_{av} = 19.76 kN/m³, $\gamma H/c$ = 12.08 > 4 → σ_a = 282.0 kPa. L'enveloppe de Peck a fourni une pression d'environ **1.8 fois** la valeur 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 ; une fouille moins profonde sort du domaine des données, et le module le signale. **L'enveloppe n'est pas la pression réelle agissant sur le mur à un instant donné** : elle fournit un effort de buton sûr, non le déplacement du mur.

La **nappe** est supposée située sous le fond de fouille ; le module maintient l'enveloppe du sable dans la contrainte effective des terres sus-jacentes et, si l'eau est plus haut, y ajoute la pression hydrostatique ; l'infiltration dans la fouille est vérifiée au fond.

Le **rideau de palplanches** est assimilé à une chaîne de poutres isostatiques articulées aux niveaux d'appui retenus ; 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 pour une lierne continue franchissant plusieurs butons).

L'acier est vérifié selon l'EN 1993-1-1 ; les sections de classe 4 ne sont pas dimensionnées, le déversement des liernes n'est pas vérifié. Une option AISC 360-22 LRFD/ASD est disponible.

Un certain déplacement latéral de l'écran est attendu : son ampleur dépend du délai entre l'excavation d'une phase et la mise en place des liernes et des butons. Ce déplacement provoque une **perte de terrain** dans le sol environnant ; sur 150 cas, le tassement maximal vaut ≈ 1.1 % de la profondeur de fouille dans l'argile molle, 0.2 % dans l'argile raide et 0.3 % dans le sol pulvérulent.

Synthèse

Points à retenir

Enveloppe : le mur étayé tourne autour de sa tête ; la pression n'est pas celle de Rankine mais un diagramme empirique tracé autour des charges mesurées. **Rectangulaire dans le sable** : $\sigma_a = 0.65\ \gamma\ H\ K_a$ (exemple : 28.12 kPa)

Plusieurs sables : $K_a(\vec{\varphi})$, K_a moyen et $K_a(\varphi'_{min})$ ne concordent pas (convexité) ; φ'_{min} est le choix prudent

Eau et surcharge séparées : l'eau réduit la contrainte effective des terres sus-jacentes mais ajoute la pression hydrostatique complète (R : 225 → 288 kN/m) ; q ajoute $\Delta p = K_a q$

Effort dans le buton : l'enveloppe est divisée en tronçons au niveau des rotules, les réactions sont déterminées par la statique, P = (somme des réactions)·s ; dans l'exemple, P_A = 318.75 kN

Dimensionnement : $S = M_{max}/\sigma_{adm}$ (rideau de palplanches), lierne $M = R\ s^2/8$; dans la fouille de l'ouvrage de référence, le rideau de palplanches est de 292 cm³/m, la lierne de 1 113 cm³

Acier : EN 1993-1-1 η = 0.373 / 0.587 / 0.411 (flambement du rideau de palplanches / de la lierne / du buton) ; AISC LRFD buton 0.460, ASD 0.432

Renard hydraulique : $FS = i_{cr}/i_{sortie} \geq 1.5$; dans l'exemple, 2.67 (réseau d'écoulement) et 1.65 (abaque)

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.

Harr, M.E. (1962). Groundwater and Seepage. McGraw-Hill, New York.

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 ces fouilles (fouille du manuel : 27 ft, γ = 112 pcf, $\varphi' = 32°$; fouille d'ouverture du module : 8 m).

Calculs géotechniques en ligne

De la théorie à la pratique

Saisir dans GeoTerva le profil de la fouille, les niveaux de butons, la nappe, la surcharge et les éléments de structure ; le module fournit ensemble l'enveloppe, les efforts dans les butons, les moments du rideau de palplanches et des liernes, la vérification de l'acier et le renard hydraulique en 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