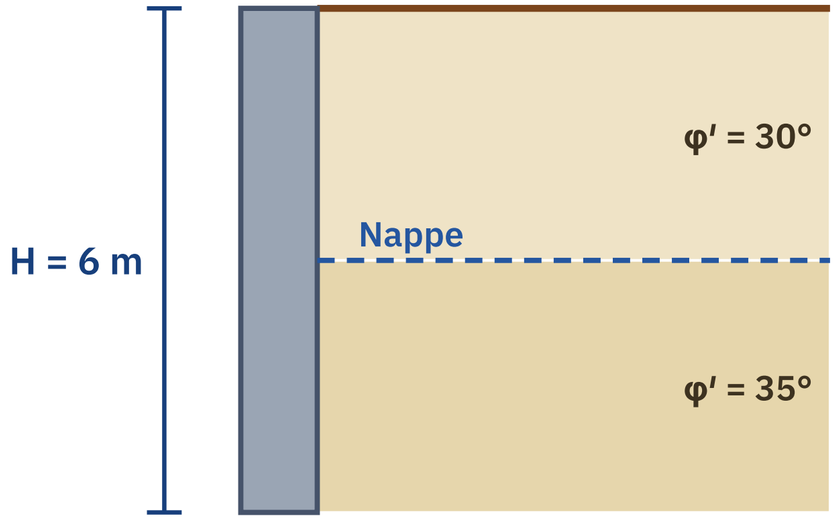
Présentation de cours de géotechnique · Poussée et butée des terres

Poussée des terres de Rankine

Cours : poussée et butée des terres s'exerçant sur un mur vertical lisse (sans frottement) ; remblai pulvérulent et remblai cohérent, surcharge, eau souterraine et sol stratifié ; un exemple de calcul pour chaque sujet.

- États actif et passif
- $K_a = \tan^2(45° - \varphi'/2)$
- Surcharge et nappe
- Remblai stratifié
- Fissure de traction



Que verrons-nous dans ce cours ?

- **Pourquoi** $\sigma'_a = K_a\sigma'_o - 2c'\sqrt{K_a}$, à l'aide du cercle de Mohr des états de poussée et de butée
- Calculer les coefficients K_a et K_p à partir de φ' ; les comparer au coefficient de pression des terres au repos K_0
- Déterminer, dans un remblai pulvérulent, la **force** et la **hauteur d'application** à partir du triangle de pression
- Voir comment la surcharge, la nappe et les limites de couches modifient le diagramme
- Séparer, dans un sol c'–φ' et $\varphi = 0$, la **zone en traction** et la force avec ou sans fissure de traction
- Calculer la résistance passive et savoir de combien le mur doit se déplacer

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

Les efforts sont rapportés à l'unité de longueur du mur (kN/m) ; les pressions sont en kPa, toutes les contraintes sont effectives.

Équilibre plastique et cercle de Mohr

THÉORIE

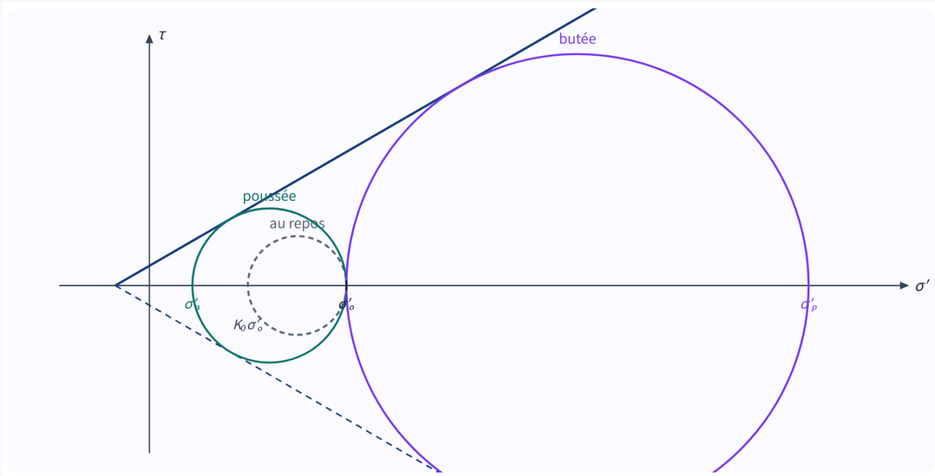
Rankine (1857) a étudié une masse de sol dont chaque point est à la limite de la rupture. Si un écran vertical lisse **s'éloigne du sol**, la contrainte horizontale diminue par rapport à la valeur au repos $K_0\sigma'_o$ et le cercle de Mohr touche l'enveloppe de rupture : **état actif**. Si l'écran **est poussé contre le sol**, la contrainte horizontale dépasse σ'_o : **état passif**.

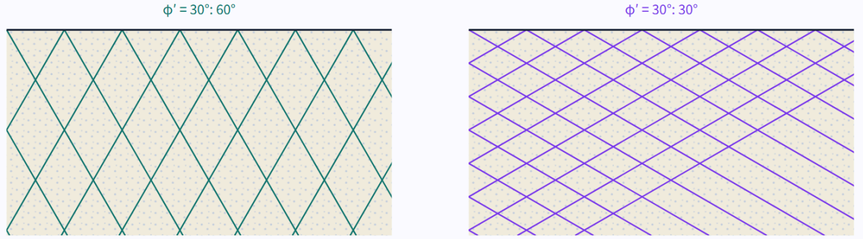
$$\sigma'_a = \sigma'_o \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi'}{2}\right) - 2c' \tan\left(45^\circ - \frac{\varphi'}{2}\right)$$

$$\sigma'_p = \sigma'_o \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2}\right) + 2c' \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2}\right)$$

σ'_o est la contrainte effective verticale (pression de confinement) ; derrière le mur, la contrainte principale majeure est verticale (en poussée) ou horizontale (en butée).

Les plans de glissement font un angle de 45° + φ′/2 avec l'horizontale en poussée et de 45° − φ′/2 en butée.





poussée : plans de glissement à 45° + ϕ′/2 de l'horizontale

butée : plans de glissement à 45° − ϕ′/2

Coefficients K_a et K_p

THÉORIE

À partir de la géométrie du cercle de Mohr, on définit deux coefficients, inverses l'un de l'autre :

$$K_a = \tan^2\left(45^\circ - \frac{\varphi'}{2}\right) = \frac{1-\sin\varphi'}{1+\sin\varphi'} \qquad K_p = \tan^2\left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2}\right) = \frac{1}{K_a}$$

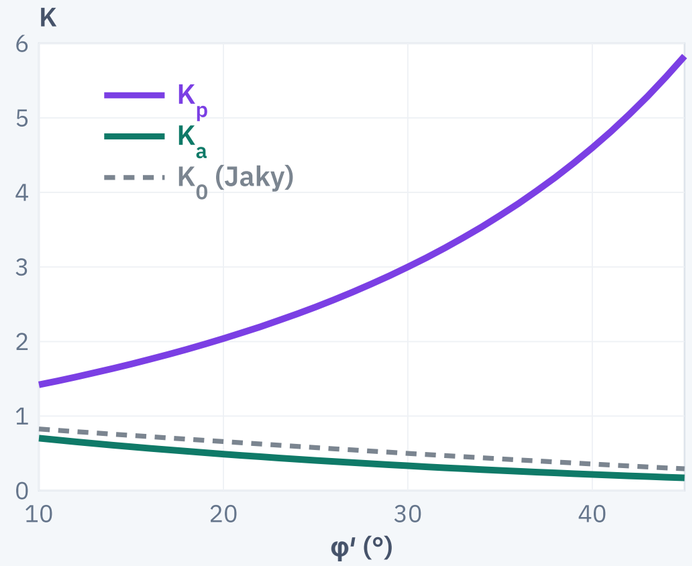
$$\sigma'_a = K_a\sigma'_o - 2c'\sqrt{K_a} \qquad \sigma'_p = K_p\sigma'_o + 2c'\sqrt{K_p}$$

φ′	25°	30°	35°	40°
K_a	0.406	0.333	0.271	0.217
K_p	2.464	3.000	3.690	4.599
K_0 (Jaky)	0.577	0.500	0.426	0.357

$K_a < K_0 < K_p$: la pression au repos, avant tout déplacement du mur, est comprise entre les deux limites.

K_p croît rapidement avec φ′ : à φ′ = 40°, la butée est plus de 20 fois supérieure à la poussée.

K_a, K_p et K_0 – φ′



Énoncé

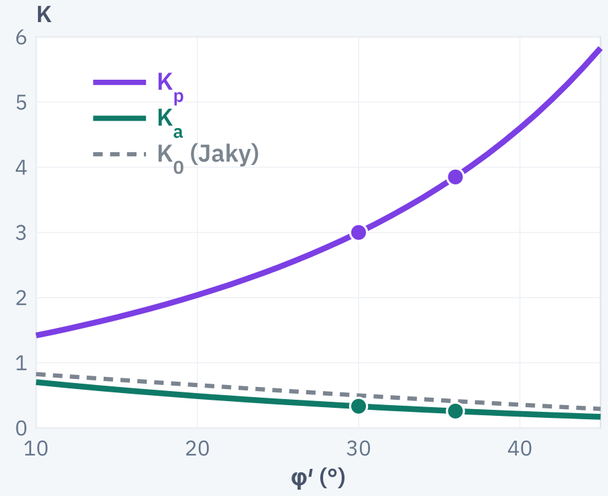
EXEMPLE

Données

Sol	**sable pulvérulent, $c' = 0$; deux cas : $\varphi' = 36°$ et $\varphi' = 30°$**
Mur	**vertical, sans frottement ; surface du remblai horizontale**

À DÉTERMINER

K_a, K_p et **K_0** selon Jaky ; vérifier l'ordre des trois.



Solution

SOLUTION

1 φ′ = 36°

$$K_a = \tan^2(45^\circ - 18^\circ) = \tan^2 27^\circ = \mathbf{0.2596} \qquad K_p = \tan^2 63^\circ = \frac{1}{K_a} = \mathbf{3.852}$$

2 φ′ = 30°

$$K_a = \frac{1 - \sin 30^\circ}{1 + \sin 30^\circ} = \frac{0.5}{1.5} = \mathbf{0.3333} \qquad K_p = \frac{1 + \sin 30^\circ}{1 - \sin 30^\circ} = \mathbf{3}$$

3 Coefficient de pression des terres au repos (Jaky) : $K_0 = 1 - \sin \varphi'$

$$\varphi' = 36^\circ : \; K_0 = 1 - 0.5878 = \mathbf{0.4122} \qquad \varphi' = 30^\circ : \; K_0 = 1 - 0.5 = \mathbf{0.50}$$

Dans les deux sols, **$K_a < K_0 < K_p$** ; $K_a \cdot K_p = 1$. Lorsque φ′ passe de 30° à 36°, K_a : 0.333 → 0.260 et K_p : 3.00 → 3.85.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Triangle de pression, force et hauteur d'application

THÉORIE

Pour c′ = 0 et un remblai à surface horizontale, la pression augmente **linéairement** avec la profondeur ; le diagramme est triangulaire. La force par unité de longueur du mur est l'aire du triangle, son point d'application est le centre de gravité (à H/3 au-dessus de la base) :

$$\sigma'_a = K_a \gamma z \qquad P_a = \tfrac{1}{2} K_a \gamma H^2 \qquad \bar{z} = \tfrac{H}{3}$$

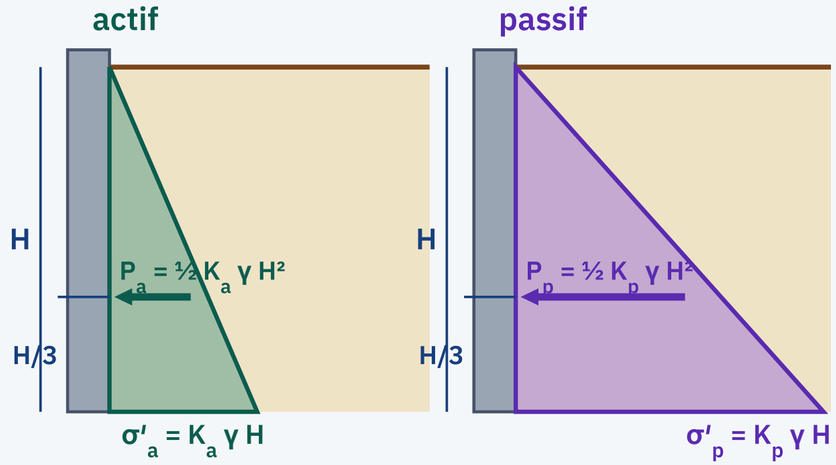
$$\sigma'_p = K_p \gamma z \qquad P_p = \tfrac{1}{2} K_p \gamma H^2 \qquad \bar{z} = \tfrac{H}{3}$$

La force croît avec **H²** : doubler la hauteur du mur multiplie la force par quatre.

La force est perpendiculaire au mur et horizontale (mur sans frottement, δ′ = 0).

Unités : γ en kN/m³, H en m donne P en kN/m.

DEUX ÉTATS LIMITES



Énoncé

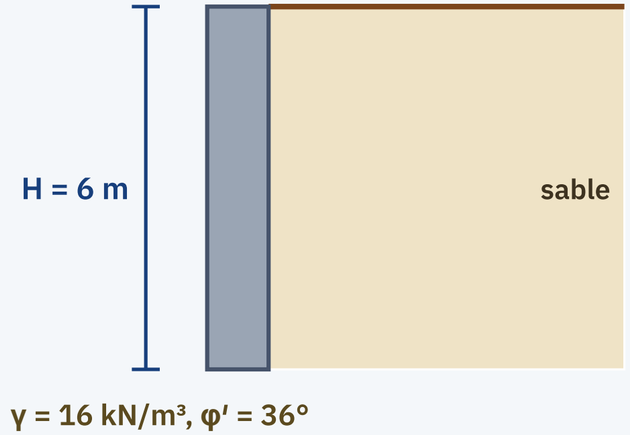
EXEMPLE

À DÉTERMINER

Forces de **poussée** et de **butée** P_a, P_p avec leur hauteur d'application ; en outre la force au repos P_0.

Données

Mur	$H = 6$ **m, vertical, sans frottement ; surface du remblai horizontale**
Sol	**sable sec :** $\gamma = 16\ \mathrm{kN/m^3},\ \varphi' = 36°,\ c' = 0$



Solution

SOLUTION

1 Coefficients (Exemple 1) : $K_a = 0.2596$, $K_p = 3.852$

$$\sigma'_a(6) = K_a \gamma H = 0.2596(16)(6) = \mathbf{24.92}\ \text{kPa}$$

2 Force active (aire du triangle)

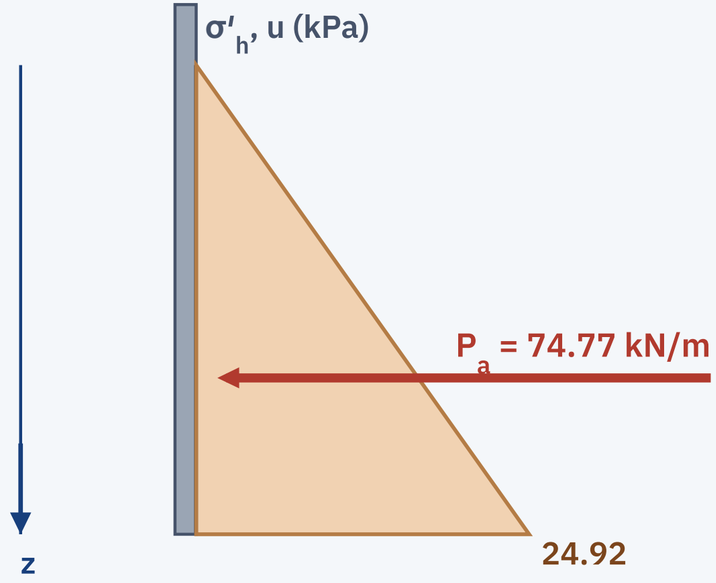
$$P_a = \tfrac{1}{2}\sigma'_a(6)\, H = \tfrac{1}{2}(24.92)(6) = \mathbf{74.77}\ \text{kN/m}$$

$$\bar{z} = \tfrac{6}{3} = \mathbf{2.0\ m}$$

3 Force de butée

$$P_p = \tfrac{1}{2} K_p \gamma H^2 = \tfrac{1}{2}(3.852)(16)(36) = \mathbf{1{,}109.3}\ \text{kN/m}$$

$$\bar{z} = \tfrac{6}{3} = \mathbf{2.0\ m}$$



P_a = **74.77 kN/m**, P_p = **1,109.3 kN/m**, tous deux à 2.0 m au-dessus de la base. La butée est **14.8 fois** la poussée active ; P_0 = 118.72 kN/m au repos se situe entre les deux.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Deux effets qui modifient le diagramme

THÉORIE

La **surcharge uniforme q** ajoute la même pression à toute profondeur : un rectangle est ajouté. **Sous la nappe**, la contrainte effective est calculée avec $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$, et la pression de l'eau $u = \gamma_w(z - H_1)$ est en outre ajoutée **pour sa valeur entière** :

$$P_a = K_a q H + \tfrac{1}{2} K_a \gamma H_1^2 + K_a \gamma H_1 H_2 + \tfrac{1}{2} \left(K_a \gamma' + \gamma_w\right) H_2^2$$

Composante	Force	Bras de levier (depuis la base)
Surcharge (rectangulaire)	$K_a\, q\, H$	$H/2$
Triangle supérieur	$\tfrac{1}{2} K_a\, \gamma\, H_1^2$	$H_2 + H_1/3$
Rectangle inférieur	$K_a\, \gamma\, H_1\, H_2$	$H_2/2$
Triangle inférieur (effectif)	$\tfrac{1}{2} K_a\, \gamma'\, H_2^2$	$H_2/3$
Pression de l'eau	$\tfrac{1}{2} \gamma_w\, H_2^2$	$H_2/3$

En prenant le moment des composantes par rapport au point de la base, on obtient la hauteur d'application : $\bar{z} = \Sigma P_i z_i \,/\, \Sigma P_i$.

La force de butée s'obtient avec les mêmes composantes en utilisant K_p ; la pression de l'eau est la même.

POURQUOI L'EAU EST-ELLE SI INFLUENTE ?

La pression de l'eau **ne dépend pas de l'angle de frottement** : elle est multipliée par 1 au lieu de K_a. Dans la zone immergée, $\gamma' \approx \gamma_{sat}/2$, de sorte que la poussée effective des terres diminue, mais la pression de l'eau la compense largement.

Énoncé

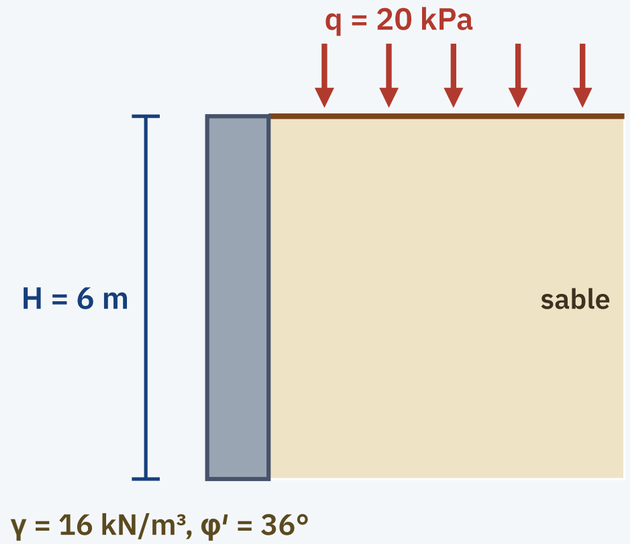
EXEMPLE

À DÉTERMINER

P_a et $\bar{z}$; effet de la surcharge.

Données

Mur et sol	**Le mur de l'exemple 2 : $H = 6$ m, $\gamma = 16\ \mathrm{kN/m^3}$, $\varphi' = 36°$, sec**
Surcharge	**charge uniformément répartie $q = 20$ kPa sur la surface du remblai**



Solution

SOLUTION

1 Pression : $K_a q$ en surface, $K_a q + K_a \gamma H$ à la base

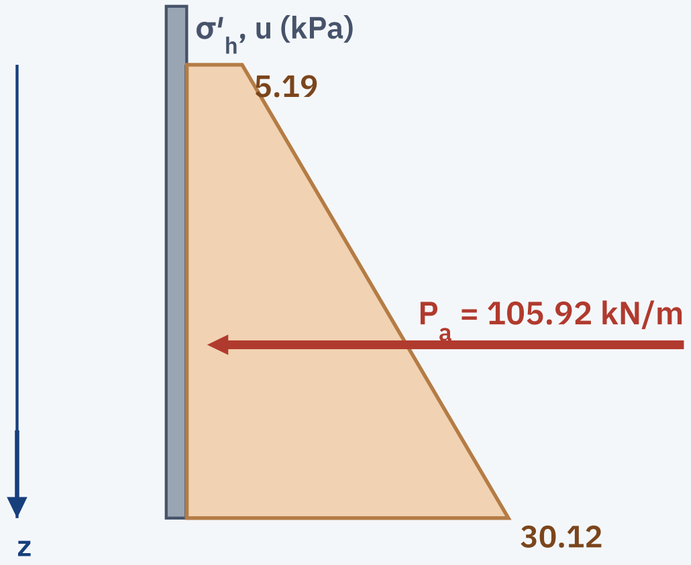
$$\sigma'_a(0) = 0.2596(20) = 5.19 \text{ kPa}$$
$$\sigma'_a(6) = 5.19 + 24.92 = \mathbf{30.12} \text{ kPa}$$

2 Forces : rectangle (bras 3.0 m) + triangle (bras 2.0 m)

$$P_q = K_a q H = 5.19(6) = 31.15 \text{ kN/m}$$
$$P_\gamma = \tfrac{1}{2} K_a \gamma H^2 = 74.77 \text{ kN/m}$$

3 Résultante et hauteur d'action

$$P_a = 31.15 + 74.77 = \mathbf{105.92} \text{ kN/m}$$
$$\bar{z} = \frac{31.15(3) + 74.77(2)}{105.92} = \mathbf{2.29} \text{ m}$$



La surcharge a augmenté la force de 31.15 kN/m (42 %) ; le point d'application est monté de **2.00 m à 2.29 m** (le bras de levier du rectangle est H/2).

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Énoncé

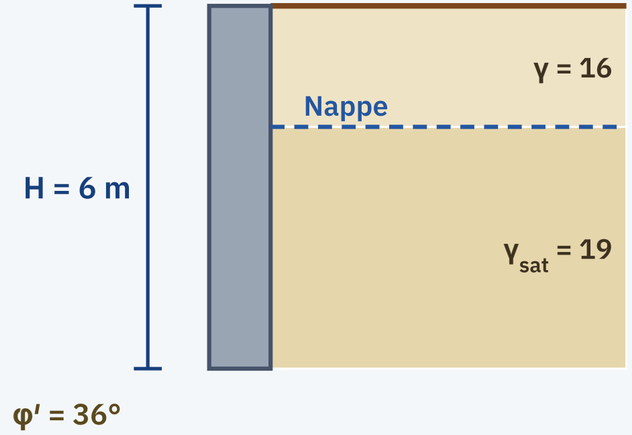
EXEMPLE

Données

Mur	$H = 6$ m, vertical ; remblai de sable à surface horizontale, sans surcharge
Sol	en haut $\gamma = 16\ \mathrm{kN/m^3}$ (sec) ; niveau de la nappe phréatique à 2 m de profondeur ; en bas $\gamma_{sat} = 19\ \mathrm{kN/m^3}$; $\varphi' = 36°$

À DÉTERMINER

Force totale issue de la poussée effective des terres et de la pression de l'eau, avec sa hauteur d'application ; effet de l'eau.



Solution

SOLUTION

1 Contraintes effectives (z = 2 et 6 m)

$$\sigma'_o(2) = 16(2) = 32 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_o(6) = 32 + 4(19 - 9.81) = 68.76 \text{ kPa}$$

$$\sigma'_a(6) = K_a\sigma'_o(6) = \mathbf{17.85} \text{ kPa}$$

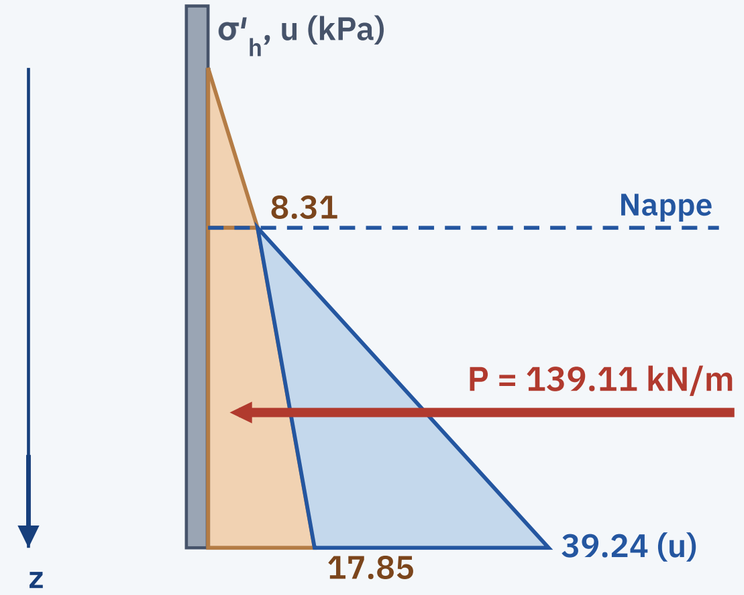
2 Pression d'eau à la base : u = γ_w(6 − 2)

$$u(6) = 9.81(4) = \mathbf{39.24} \text{ kPa}$$

3 Forces : triangle supérieur · rectangle inférieur · triangle inférieur · eau

$$P_a = 8.31 + 33.23 + 19.09 = 60.63 \text{ kN/m (sol)}$$

$$P_w = \tfrac{1}{2}(39.24)(4) = 78.48 \text{ kN/m}$$



Total = 60.63 + 78.48 = **139.11 kN/m**, **z̄ = 1.69 m**. La force sur le mur sec était de 74.77 kN/m : la force de l'eau l'a portée à **1.9 fois** sa valeur.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Chaque couche utilise sa propre valeur de K

THÉORIE

Si le remblai comporte plusieurs couches, la **contrainte verticale effective σ'_o est continue** (elle ne présente pas de saut à la limite entre couches) ; en revanche, la contrainte horizontale $\sigma'_a = K_i \sigma'_o$ utilisant dans chaque couche sa propre valeur de K_i, **le diagramme présente un saut à la limite où φ′ change** :

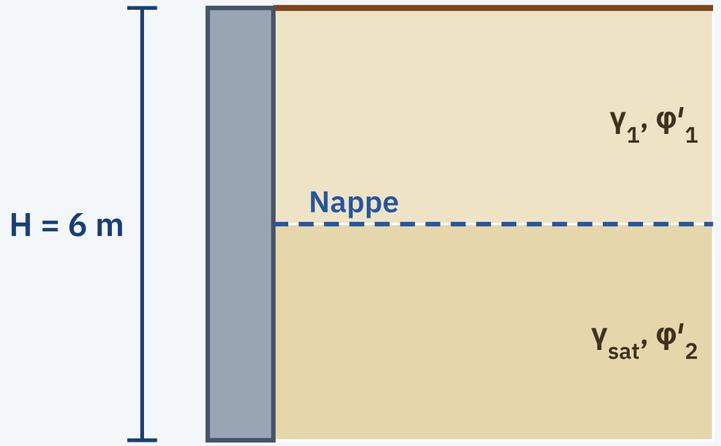
$$\sigma'_a = K_{a,i}\,\sigma'_o(z) \qquad \sigma'_o(z) = q + \sum \gamma_i h_i \;\; (\gamma' \text{ en zone submergée})$$

À l'interface, deux valeurs sont lues : la valeur $K_{a,1}\sigma'_o$ de la couche supérieure et la valeur $K_{a,2}\sigma'_o$ de la couche inférieure. Si la valeur de φ′ de la couche inférieure est élevée, la pression **chute** vers le bas.

Le niveau de la nappe phréatique est traité comme une limite de couche : γ′ commence, u s'ajoute.

La force est obtenue en sommant les aires de chaque partie (triangle / rectangle) ; sa hauteur d'application est déterminée par la prise de moments.

REMBLAI STRATIFIÉ ET EAU



Énoncé

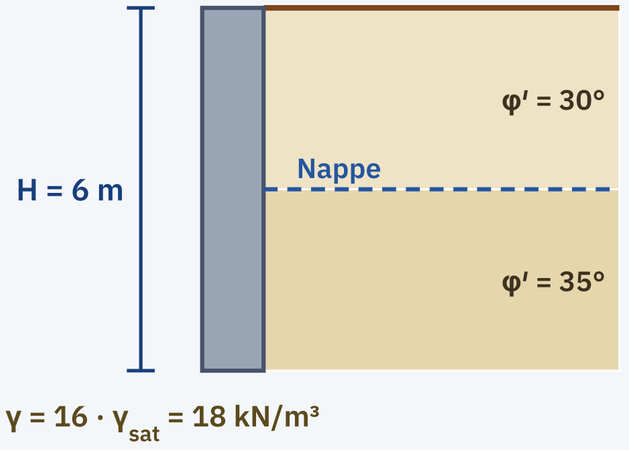
EXEMPLE

Données

Mur	$H = 6$ **m, vertical, sans frottement ; surface horizontale ; pas de surcharge**
Couche supérieure (0–3 m)	**sable :** $\gamma = 16\ \mathrm{kN/m^3},\ \varphi' = 30°$
Couche inférieure (3–6 m)	**sable :** $\gamma_{sat} = 18\ \mathrm{kN/m^3},\ \varphi' = 35°$
Niveau de la nappe phréatique	**À 3 m de profondeur (à la limite de couche)**

À DÉTERMINER

Force totale (sol + eau) et **hauteur d'application**. L'exemple chargé à l'ouverture du module est ce mur.



Solution (1/2)

SOLUTION

1 Coefficients

$$K_{a,1} = \tfrac{1}{3} = \mathbf{0.3333} \qquad K_{a,2} = \tan^2 27.5^\circ = \mathbf{0.2710}$$

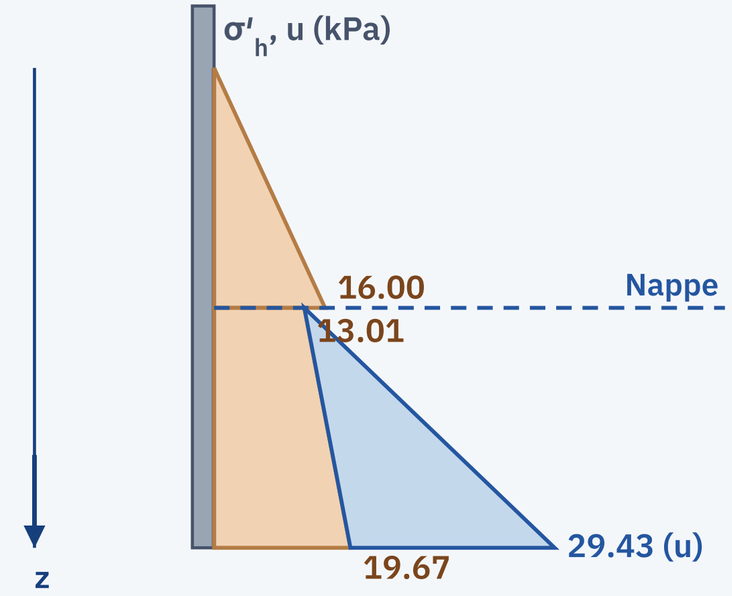
2 à 3 m de profondeur (limite) : $\sigma'_o = 16(3) = 48$ kPa

$$\sigma'_a = 0.3333(48) = \mathbf{16.00}\ \text{kPa (en haut)}$$
$$\sigma'_a = 0.2710(48) = \mathbf{13.01}\ \text{kPa (en bas)}$$

3 À 6 m de profondeur (base)

$$\sigma'_o = 48 + 3(18 - 9.81) = 72.57\ \text{kPa} \qquad u = 9.81(3) = \mathbf{29.43}$$
$$\sigma'_a = 0.2710(72.57) = \mathbf{19.67}\ \text{kPa}$$

Le diagramme saute à la limite de 16.00 → 13.01 kPa (changement de φ′) ; σ'_o reste continue.



Solution (2/2)

SOLUTION

4 Forces : triangle supérieur · rectangle inférieur · triangle inférieur · eau

$$P = \tfrac{1}{2}(3)(16.00) + 3(13.01) + \tfrac{1}{2}(3)(6.66) + \tfrac{1}{2}(3)(29.43)$$
$$= 24.00 + 39.02 + 9.99 + 44.14 = \mathbf{117.15}\ \mathrm{kN/m}$$

5 Hauteur d'application : moment par rapport au point de la base (bras 4 ; 1.5 ; 1 ; 1 m)

$$\bar{z} = \frac{24.00(4) + 39.02(1.5) + 9.99(1) + 44.14(1)}{117.15} = \mathbf{1.78}\ \mathrm{m}$$

La force totale est de **117.15 kN/m**, située à **1.78 m** au-dessus de la base ; le sol y contribue pour 73.01 kN/m et l'eau pour 44.14 kN/m. Avec environ 38 %, l'eau constitue la composante la plus importante de la force.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Zone de traction et fissures de traction

THÉORIE

Dans un sol c′–φ′, la poussée active est **négative** en tête (le sol tend à tirer le mur) ; profondeur à laquelle la pression s'annule :

$$z_0 = \frac{2c'}{\gamma\sqrt{K_a}} - \frac{q}{\gamma} \qquad \varphi = 0 : \; z_0 = \frac{2c_u}{\gamma}$$

Le sol ne peut pas tirer sur le mur : avec le temps, des **fissures de traction** s'ouvrent jusqu'à la profondeur z_0. La force n'est que la partie positive du diagramme :

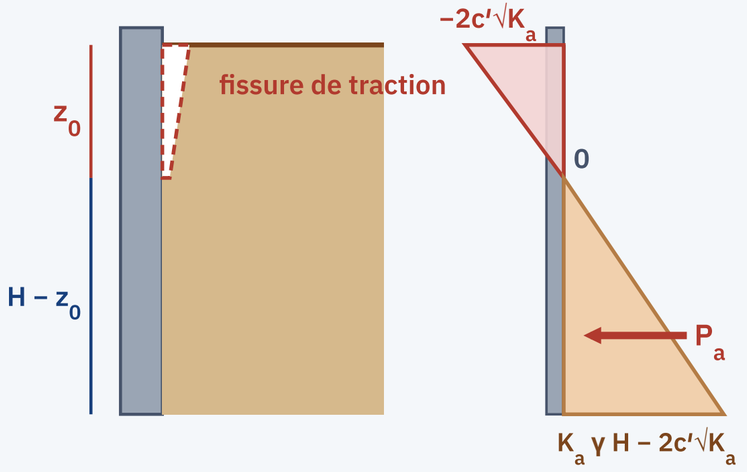
$$P_a = \tfrac{1}{2}\left[K_a(q+\gamma H) - 2c'\sqrt{K_a}\right](H - z_0)$$

Avant la fissuration, le diagramme est pris en compte dans son ensemble (force plus faible) : $P_a = ½K_a\gamma H^2 - 2c'\sqrt{K_a}\,H + K_a qH$.

Pour le dimensionnement, la force avec fissure de traction (la plus grande) est retenue ; si la fissure se remplit d'eau, la force hydrostatique $\gamma_w z_0^2/2$ s'y ajoute.

La hauteur d'application est le centre de gravité du triangle positif : $(H - z_0)/3$.

ZONE DE TRACTION



Pression négative : sur une profondeur z_0 sous le sommet, il n'y a pas de contact avec le mur.

Énoncé

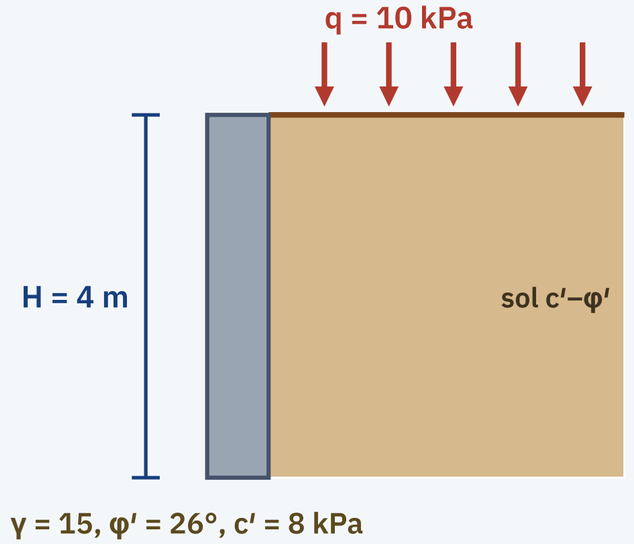
EXEMPLE

Données

Mur	$H = 4$ **m, vertical, sans frottement ; surface horizontale**
Sol	$\gamma = 15\ \mathrm{kN/m^3},\ \varphi' = 26°,\ c' = 8$ **kPa**
Surcharge	$q = 10$ **kPa**

À DÉTERMINER

Profondeur de traction z_0, force active avec fissure et hauteur d'application ; comparaison avec la force sans fissure.



Solution (1/2)

SOLUTION

1 Coefficient : $K_a = \tan^2(45° - 13°)$

$$K_a = \tan^2 32^\circ = \mathbf{0.3905} \qquad \sqrt{K_a} = 0.6249$$

$$2c'\sqrt{K_a} = 2(8)(0.6249) = 10.00 \text{ kPa}$$

2 Pression en tête et à la base

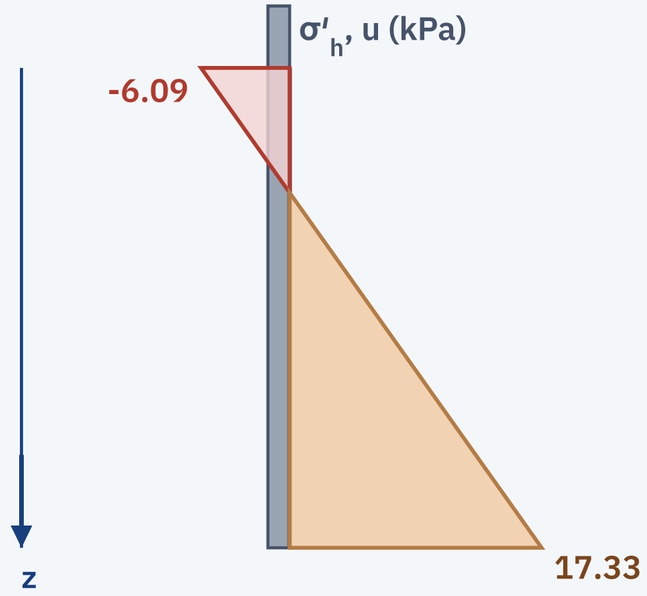
$$\sigma'_a(0) = 0.3905(10) - 10.00 = -\mathbf{6.09} \text{ kPa (traction)}$$

$$\sigma'_a(4) = 0.3905(10 + 15 \cdot 4) - 10.00 = \mathbf{17.33} \text{ kPa}$$

3 Profondeur de traction (où la pression s'annule)

$$z_0 = \frac{2(8)}{15(0.6249)} - \frac{10}{15}$$

$$= 1.707 - 0.667 = \mathbf{1.04} \text{ m}$$



Solution (2/2)

SOLUTION

4 Poussée avec fissure de traction (triangle positif uniquement)

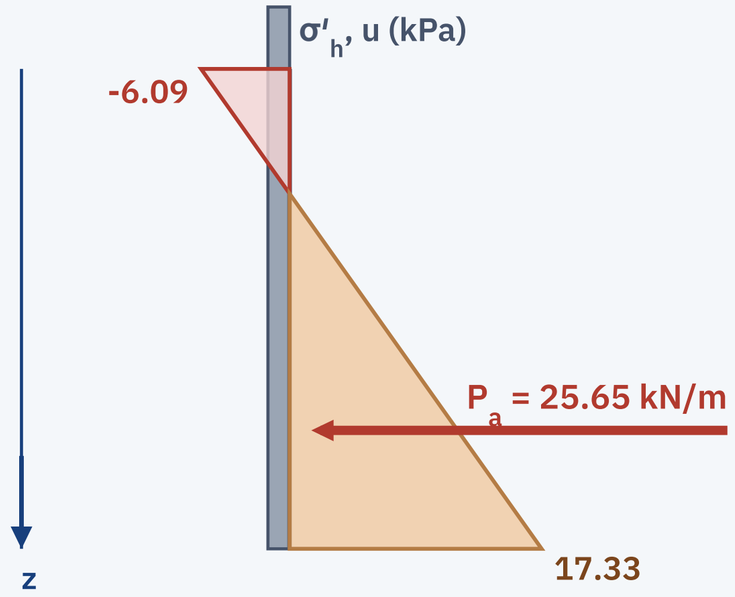
$$P_a = \tfrac{1}{2}(17.33)(4 - 1.04) = \mathbf{25.65}\ \mathrm{kN/m}$$

$$\bar{z} = \frac{4 - 1.04}{3} = \mathbf{0.99}\ \mathrm{m}$$

5 Comparaison : non fissuré (zone négative incluse)

$$P_a = \tfrac{1}{2}(-6.09 + 17.33)(4) = 22.48\ \mathrm{kN/m}$$

La force avec fissure de traction est de **25.65 kN/m**, soit 14 % de plus que la force sans fissure ; la valeur avec fissure est du côté de la sécurité.



Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Énoncé

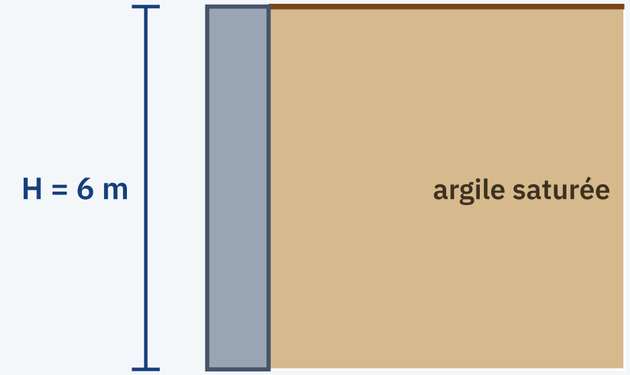
EXEMPLE

Données

Mur	$H = 6$ **m, vertical ; surface horizontale ; pas de surcharge**
Sol	**argile saturée, non drainée :** $\gamma = 18\ \mathrm{kN/m^3},\ \varphi = 0,\ c_u = 25$ **kPa**

À DÉTERMINER

z_0, poussée active avec et sans fissure ; butée ; hauteur H_c pouvant être coupée verticalement sans mur.



Solution (1/2)

SOLUTION

1 Pour φ = 0, $K_a = K_p = 1$: profondeur de traction et pression à la base

$$\sigma_a = \gamma z - 2c_u = 18z - 50 \text{ kPa}$$

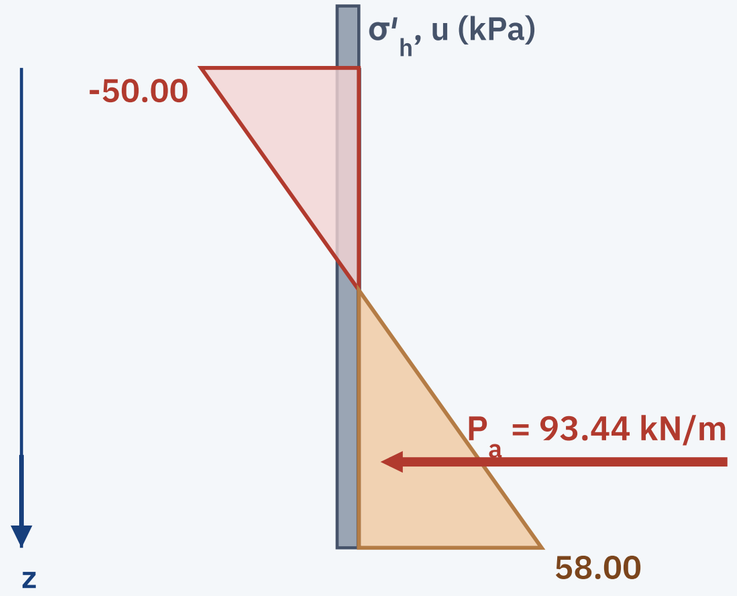
$$z_0 = \frac{2c_u}{\gamma} = \frac{50}{18} = \mathbf{2.78} \text{ m}$$

$$\sigma_a(6) = 108 - 50 = \mathbf{58} \text{ kPa}$$

2 Poussée active avec fissure

$$P_a = \tfrac{1}{2}(58)(6 - 2.78) = \mathbf{93.44} \text{ kN/m}$$

$$\bar{z} = \frac{6 - 2.78}{3} = 1.07 \text{ m}$$



Solution (2/2)

SOLUTION

3 Poussée active et butée sans fissures

$$P_a = \tfrac{1}{2}\gamma H^2 - 2c_u H = 324 - 300 = \mathbf{24}\ \mathrm{kN/m}$$

$$P_p = \tfrac{1}{2}\gamma H^2 + 2c_u H = 324 + 300 = \mathbf{624}\ \mathrm{kN/m}$$

4 Hauteur pouvant être excavée verticalement sans mur (P_a = 0 sans fissures)

$$\tfrac{1}{2}\gamma H_c^2 - 2c_u H_c = 0 \ \Rightarrow\ H_c = \frac{4c_u}{\gamma} = \frac{4(25)}{18} = \mathbf{5.56}\ \mathrm{m}$$

La force avec fissure (93.44 kN/m) vaut **3.9 fois** la force sans fissure (24 kN/m) : dans un sol cohérent, l'hypothèse d'une fissure détermine le résultat. Comme H = 6 m est supérieur à H_c = 5.56 m, même la force sans fissure est positive.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

La cohésion augmente la résistance passive

THÉORIE

En butée, la cohésion ajoute de la résistance **à toute profondeur** ; il n'y a ni zone de traction ni fissure. La pression en tête n'est pas nulle :

$$\sigma'_p(z) = K_p\,(q + \gamma z) + 2c'\sqrt{K_p}$$

$$P_p = \tfrac{1}{2}K_p\gamma H^2 + K_p q H + 2c'\sqrt{K_p}\,H \qquad \varphi = 0 :\ P_p = \tfrac{1}{2}\gamma H^2 + 2c_u H$$

Le diagramme des pressions est **trapézoïdal** : la cohésion et la surcharge ajoutent un rectangle, γz un triangle.

La hauteur d'application est déterminée en prenant les moments (part de la cohésion à H/2).

La résistance passive dépend d'un déplacement suffisant du mur ; elle n'est pas utilisée en totalité dans le dimensionnement, mais réduite au moyen d'un coefficient.

COMPARAISON POUSSÉE – BUTÉE

	Actif	Passif
Coefficient	$K_a < 1$	$K_p > 1$
Cohésion	**réduit** la pression ($-2c'\sqrt{K_a}$)	**augmente** la résistance ($+2c'\sqrt{K_p}$)
Zone de traction	existe (z_0)	aucun
Plan de glissement	45° + φ′/2	45° − φ′/2
Déplacement requis	petit	grand

Énoncé

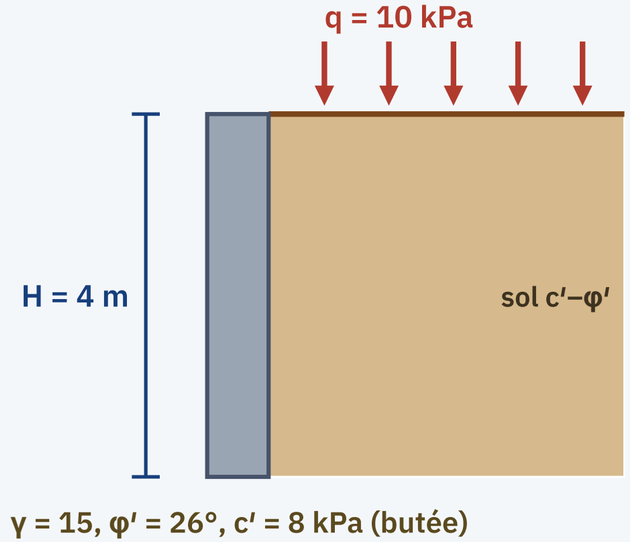
EXEMPLE

Données

Mur et sol	**Mur et sol de l'exemple 6 :** $H = 4$ **m,** $\gamma = 15\ \mathrm{kN/m^3}$, $\varphi' = 26°$, $c' = 8$ **kPa**
Surcharge	$q = 10$ **kPa (côté butée)**

À DÉTERMINER

Force de butée P_p et hauteur de son point d'application.



Solution

SOLUTION

1 Coefficient : $K_p = \tan^2(45° + 13°)$

$$K_p = \tan^2 58° = \mathbf{2.561} \qquad 2c'\sqrt{K_p} = 2(8)(1.600) = 25.61 \text{ kPa}$$

2 Pression en tête et à la base

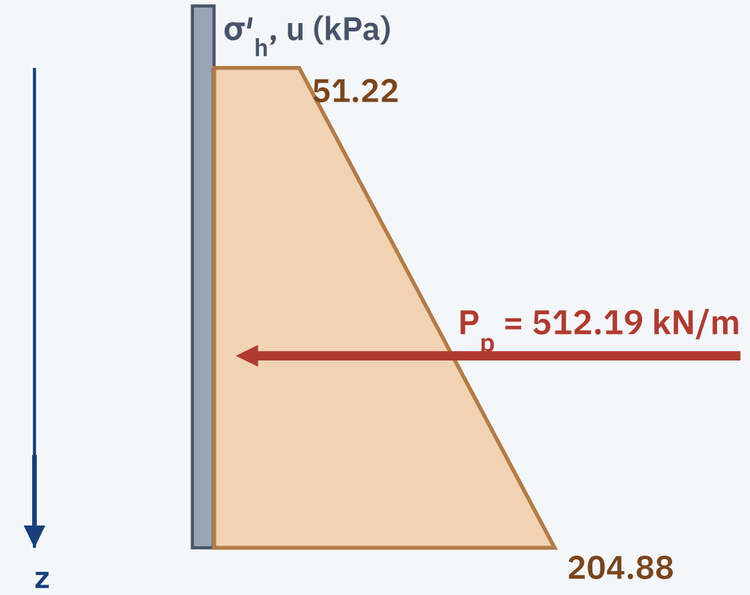
$$\sigma'_p(0) = 2.561(10) + 25.61 = \mathbf{51.22} \text{ kPa}$$

$$\sigma'_p(4) = 2.561(10 + 60) + 25.61 = \mathbf{204.88} \text{ kPa}$$

3 Aire du trapèze et centre de gravité

$$P_p = \tfrac{1}{2}(51.22 + 204.88)(4) = \mathbf{512.2} \text{ kN/m}$$

$$\bar{z} = \frac{51.22(4)(2) + \frac{1}{2}(153.66)(4)(\frac{4}{3})}{512.2} = \mathbf{1.60} \text{ m}$$



Butée **512.2 kN/m**, à 1.60 m au-dessus de la base ; environ **20 fois** la poussée active, avec fissure de traction, du même mur.

Vérifier la solution dans GeoTerva ↗

Quel déplacement est nécessaire pour mobiliser les états actif et passif ?

THÉORIE

Pour atteindre les états de Rankine, le mur doit s'éloigner du sol (poussée) ou se rapprocher du sol (butée). **Le déplacement nécessaire pour la butée est bien supérieur à celui de la poussée** ; rapporté à la hauteur H :

Sol	Actif $\Delta L_a/H$	Passif $\Delta L_p/H$	poussée active pour H = 6 m	poussée pour H = 6 m
Sable lâche	0.001–0.002	0.01	6–12 mm	60 mm
Sable dense	0.0005–0.001	0.005	3–6 mm	30 mm
Argile molle	0.02	0.04	120 mm	240 mm
Argile raide	0.01	0.02	60 mm	120 mm

Si le mouvement n'atteint pas ces valeurs, la pression reste supérieure à K_a et inférieure à K_p ; si le mur est entièrement bloqué, la pression au repos K_0 se développe.

Pour un mur tournant autour de sa base, ces rapports s'appliquent au déplacement en tête.

Domaine de validité de la solution de Rankine

THÉORIE

Le mur : vertical et lisse (δ′ = 0) ; la pression est horizontale et perpendiculaire au mur. En réalité, le frottement mur-sol réduit la poussée active et augmente la butée ; Rankine se situe légèrement du côté de la sécurité en poussée active et du côté prudent (sécuritaire) en butée.

Remblai : surface horizontale, chaque couche homogène ; surfaces de rupture planes. Pour un remblai incliné et un mur incliné, voir le module Rankine (remblai incliné).

Contraintes : la contrainte effective est la grandeur de base ; la pression d'eau est ajoutée séparément, et pour l'argile la solution non drainée (φ = 0) peut aussi être utilisée avec la contrainte totale.

Surcharge : charge uniformément répartie ; les modules de charge en bande, de charge ponctuelle et de charge linéique sont traités séparément.

Séisme : Rankine est une solution statique ; pour le séisme, on utilise les modules Mononobe–Okabe et butée sismique.

Synthèse

Points à retenir

États : actif (le mur s'éloigne) $\sigma'_a = K_a\sigma'_o - 2c'\sqrt{K_a}$; passif (le mur est poussé) $\sigma'_p = K_p\sigma'_o + 2c'\sqrt{K_p}$

Coefficients : $K_a = \tan^2(45° - \varphi'/2)$, $K_p = 1/K_a$; $K_a < K_0 = 1 - \sin\varphi' < K_p$

Remblai pulvérulent : $P = \frac{1}{2}K\gamma H^2$, à $H/3$ depuis la base ; l'effort croît avec H^2

La **surcharge** ajoute un bloc rectangulaire ($K\,q\,H$, bras de levier $H/2$) ; l'**eau** ajoute la pression interstitielle complète $u = \gamma_w(z - H_1)$, indépendante de φ', et multiplie plusieurs fois la force

Dans les sols stratifiés, σ'_o est continue, σ'_a présente un saut à la limite où φ' change ; la force s'obtient en découpant en parties, $\bar{z}$ en prenant les moments

Dans un **sol c′–φ′**, $z_0 = 2c'/(\gamma\sqrt{K_a}) - q/\gamma$; avec fissure de traction, la force se réduit au seul triangle positif ; elle est supérieure à la force sans fissure

La **butée** augmente avec la cohésion et il n'existe pas de zone en traction ; mais le mur doit se déplacer **bien davantage** que dans le cas de la poussée

Références bibliographiques

Das, B.M. (2018). Principles of Geotechnical Engineering, 9th ed. Cengage Learning.

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

REMARQUE

Tous les exemples numériques ont été produits avec le moteur de calcul propre du module ; le module donne les mêmes valeurs. Le module s'ouvre avec le mur à deux couches de l'exemple 5.

GeoTerva

Calculs géotechniques en ligne

De la théorie à la pratique

Saisir dans GeoTerva les couches, la surcharge et le niveau de la nappe de son propre mur ; le module donne conjointement le diagramme de pression, la force et la hauteur d'application.

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