

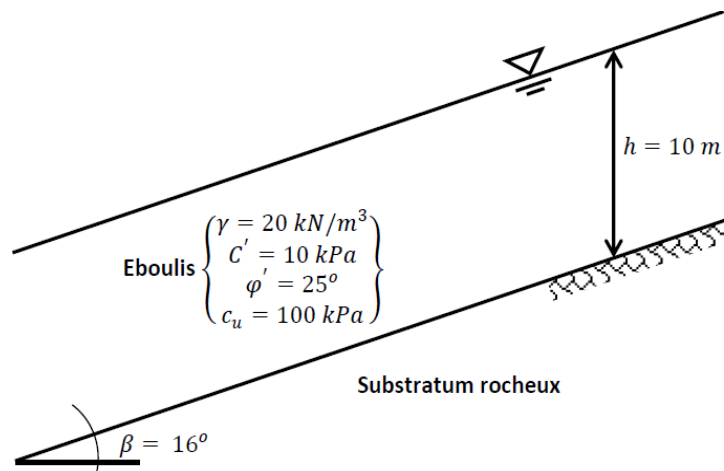
## Serie 1 : Talus en glissement plan

### Exercice 1

Une ville désirent aménager les bords d'une rivière fait faire une étude de la stabilité du versant et des ouvrages à construire sur un terrain dont elle a déjà fait l'acquisition.

Les résultats d'essais sont très dispersés du fait de l'hétérogénéité du sol ; les valeurs moyennes sont indiquées sur la figure ci-après ; les relevés piézométriques indiquent que la nappe est au niveau du terrain naturel. L'écoulement est parallèle à la pente.

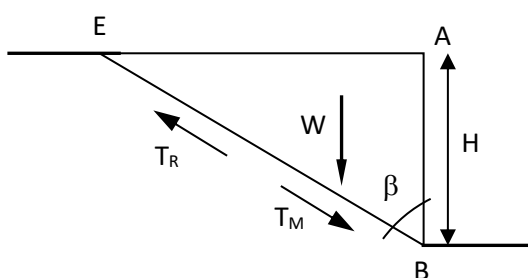
- 1) Déterminer en rupture plane le coefficient de sécurité du versant naturel.
- 2) Quel rabattement faut-il envisager pour amener ce coefficient de sécurité à 1.2 à l'aide d'un réseau de tranchées drainante couvrant l'ensemble de la zone?
- 3) Calculer le coefficient de sécurité en cas de rabattement total de la nappe



### Exercice 2

Soit une surface de glissement plane, inclinée d'un angle  $\beta$  des parois d'une fouille (figure ci-contre). Le poids du triangle AEB est  $W$ , la force motrice sur la surface de glissement EB est  $T_M$  et la force résistante dans le plan du glissement est  $T_R$ . Le massif du sol est supposé homogène avec les caractéristiques à court terme suivantes :  $\gamma_{\text{sat}}$ ,  $c_u$ ,  $\varphi_u = 0$ .

- 1- Déterminer le coefficient de sécurité de cet ouvrage géotechnique.
- 2- Déterminer le coefficient de sécurité minimum.



## Serie 2 : Talus en glissement plan

### Exercice 1

Dans le cas de glissement selon un plan parallèle à la pente (Figure 1)

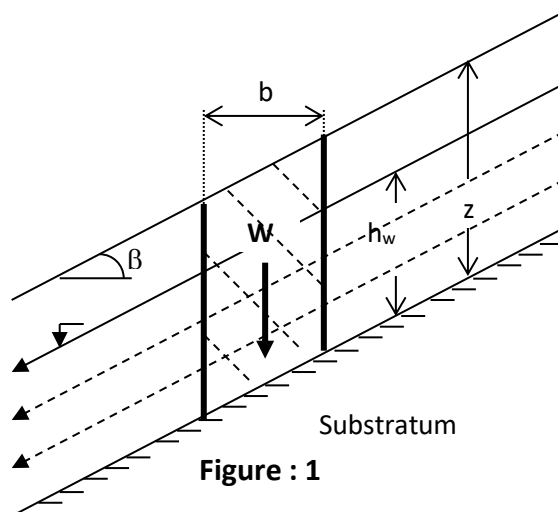
- 1) Montrer que le facteur de sécurité se réduit au rapport de résistance au cisaillement sur la contrainte de cisaillement appliquée :  $F_s = \frac{\tau_r}{\tau}$
- 2) Développer, à partir de l'équilibre limite d'une tranche verticale, l'expression du facteur de sécurité  $F_s$  suivante :

$$F_s = \frac{\tau_r}{\tau} = \frac{c' + (\sum \gamma \cdot h - \gamma_w \cdot h_w) \cos^2 \beta \cdot \tan \varphi'}{\sin \beta \cdot \cos \beta \sum \gamma \cdot h}$$

- 3) Dédurre l'expression simplifiée de  $F_s$  pour le cas d'une pente sableuse et sèche.
- 4) Dédurre l'expression simplifiée de  $F_s$  pour le cas d'une pente sableuse avec écoulement parallèle sur toute la hauteur de la couche. Que peut-on déduire sur l'effet d'écoulement?
- 5) Une pente naturelle formée d'éboulis argileux d'épaisseur verticale  $z = 4\text{m}$  fait un angle  $\beta = 10^\circ$  avec l'horizontale. Les caractéristiques physiques et de résistance au cisaillement sont :  $\gamma_{\text{sat}} = 18 \text{ kN/m}^3$ ,  $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3$ ,  $c' = 0$  et  $\varphi' = 15^\circ$ .

Pour quelle hauteur d'eau ( $h_w$ ) d'un écoulement hydraulique uniforme, parallèle à la pente, se produira la rupture ( $F_s=1$ )?

Peut-on dans ce cas, par un drainage approprié, élever le facteur de sécurité jusqu'à 1.5?



## Exercice 2

Soit un talus à forte pente  $\beta = 60^\circ$  et de hauteur  $H = 10$  m, sa longueur est très grande par rapport à la hauteur, si bien qu'on peut travailler en déformation plane et donc par mètre (perpendiculairement au plan de la Figure 2).

Le sol est supposé homogène avec les caractéristiques suivantes :  $\gamma = 20$  kN/m<sup>3</sup>,  $c' = 30$  kPa,  $\varphi' = 30^\circ$

- 1) Établir les équations correspondant à l'équilibre limite et en déduire la formule permettant d'obtenir le coefficient de sécurité  $F_\theta$  pour une ligne de glissement inclinée à  $\theta$  sur l'horizontal et passant par le pied du talus, vérifier que vous retrouvez bien la valeur donnée par la formule :

$$F_\theta = \frac{\tan\varphi'}{\tan\theta} + \frac{c}{w.\sin\theta}$$

- 2) Déterminer  $F_\theta$  pour une valeur de  $\theta = 30^\circ$ .

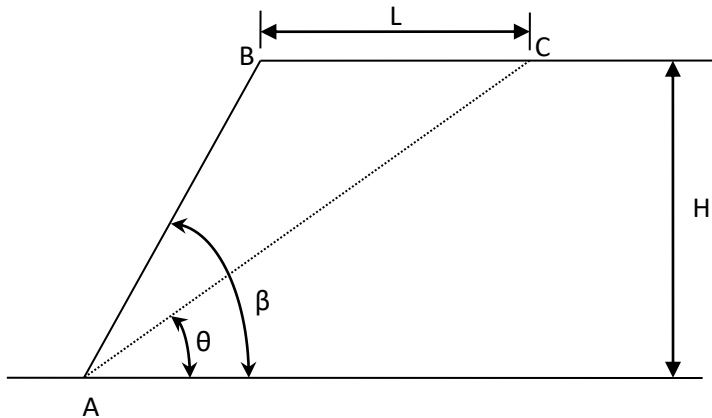


Figure 2



## Série 4: Stabilité de pente

### Méthodes des tranches (Méthode de Bishop simplifiée)

Examinez la stabilité de la pente aux abords de notre bâtiment en calculant le facteur de sécurité.

La figure et le tableau ci-dessous récapitulent l'ensemble des données géométriques et géotechniques :

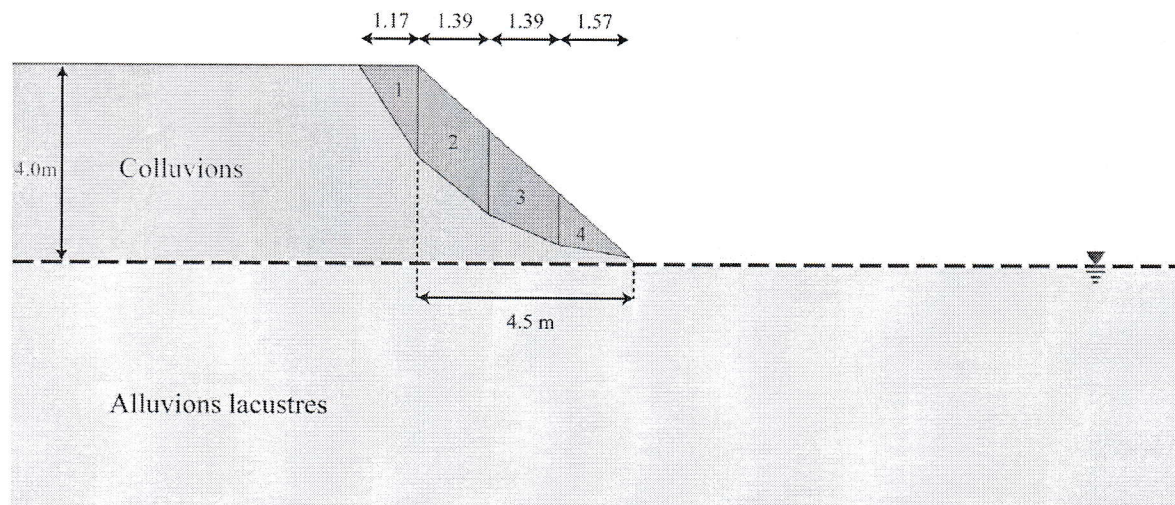


Figure 1 : Schéma de la pente avec un plan de rupture circulaire

Caractéristiques géotechniques	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\phi'$ [°]	$c'$ [kN/m <sup>2</sup> ]
Colluvions	20	29	5
Alluvions lacustres	20	30	10

Tableau 1 : Données géotechniques

**10.1 :** Calculez, par la méthode de Bishop simplifiée, le facteur de sécurité à long terme présenté par la surface de rupture circulaire proposée à la figure 1.

**Remarque :** afin de ne pas perdre trop de temps inutilement, la géométrie des quatre tranches est donnée,

de gauche à droite :

*Tranche 1 :*

hauteur moyenne  $h_1$  : 0.92 m

largeur  $x_1$  : 1.17 m

angle  $\alpha_1$  : 57.4°

*Tranche 2 :*

hauteur moyenne  $h_2$  : 1.78 m

largeur  $x_2$  : 1.39 m

angle  $\alpha_2$  : 39.3°

*Tranche 3 :*

hauteur moyenne  $h_3$  : 1.43 m

largeur  $x_3$  : 1.39 m

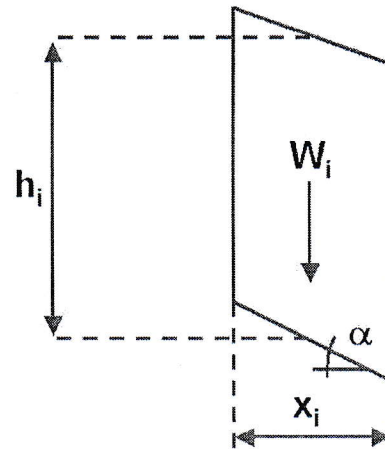
angle  $\alpha_3$  : 24.1°

*Tranche 4 :*

hauteur moyenne  $h_4$  : 0.56 m

largeur  $x_4$  : 1.57 m

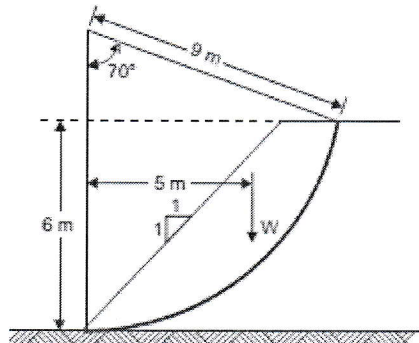
angle  $\alpha_4$  : 10.6°



## Série 5: Stabilité pour un sol purement cohérent

### Exercice 1

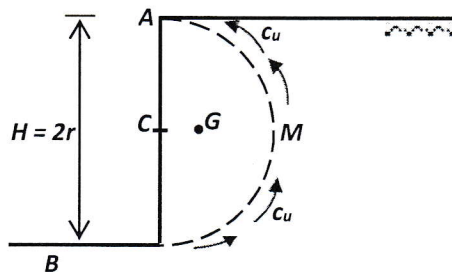
La Figure ci-après montre les détails d'un remblai en sol cohérent avec  $\phi = 0$  et  $c = 30 \text{ kN/m}^2$ . Le poids unitaire du sol est de  $18,9 \text{ kN/m}^3$ . Déterminer le facteur de sécurité vis-à-vis au glissement le long du cercle d'essai illustré. Le poids de la masse glissante est de  $360 \text{ kN}$ , agissant à une excentricité de  $5,0 \text{ m}$  du centre de rotation.



### Exercice 2

Soit une fouille verticale de hauteur  $H$ , taillée dans un matériau argileux de cohésion non drainée  $c_u$ , de poids volumique saturé  $\gamma_{sat}$  (figure ci-après).

Étudier la stabilité dans l'hypothèse d'un cercle de glissement centré à mi-hauteur.

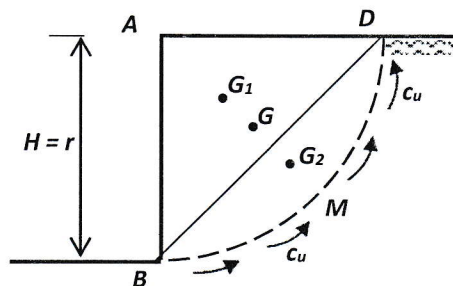


$$CG = \frac{4}{3} r \frac{\sin^3(\alpha/2)}{\alpha - \sin\alpha}$$

Le centre de gravité du demi-cercle AMB est situé au point G tel que :

### Exercice 3

Même question que dans l'exercice 1, mais on supposera que le cercle de glissement est centré au sommet de la paroi de la fouille.



## Résolution de certains cas à l'aide d'abaques ou de formules

### 1. Stabilité d'un talus dans un sol purement cohérent - Méthode de Taylor

La figure 1 schématise le talus étudié. On définit le nombre de stabilité par :

$$N_s = \frac{\gamma \cdot H}{c_u} \quad (1)$$

On peut exploiter l'abaque de la figure 2 pour déterminer  $N_s$  en fonction de l'angle  $\beta$  du talus et du coefficient  $n_d$ , afin d'étudier les caractéristiques géométriques de ce talus, en état d'équilibre limite ( $F_s = 1$ ). On peut ainsi déduire de l'équation (1) la hauteur  $H_c$  correspondant à l'équilibre limite du talus, ou la cohésion minimale  $c_u^{min}$  assurant la stabilité au glissement.

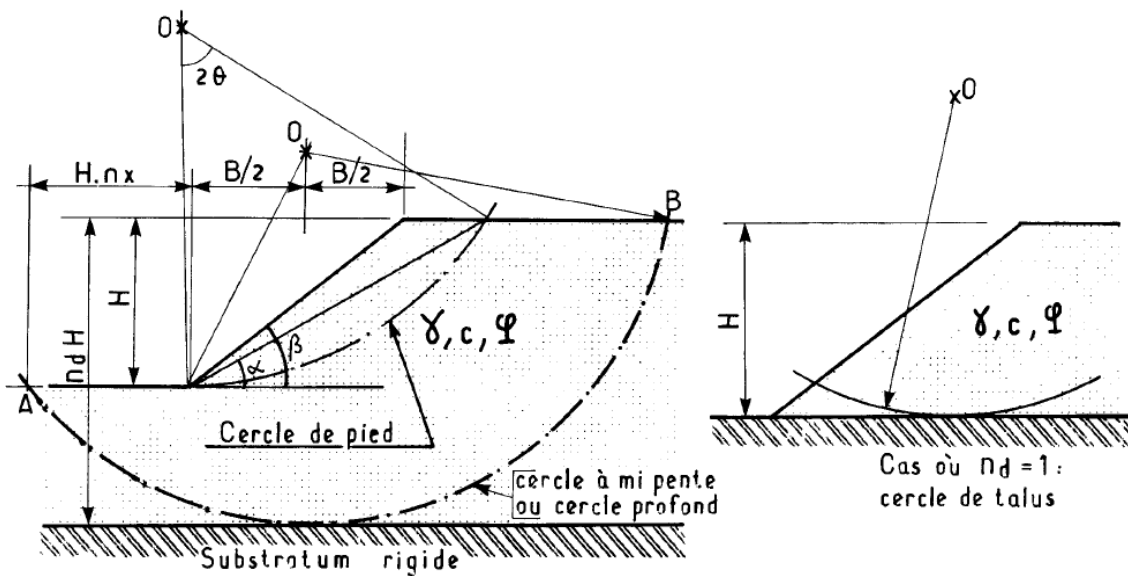


Figure 1 Notation des paramètres de la méthode de Taylor

On définit un coefficient de sécurité global par rapport à la hauteur  $H$  du talus par :

$$F_s = \frac{H_c}{H} \quad (2)$$



ou par rapport à la cohésion non drainée :

$$F_s = \frac{c_u}{c_u^{min}}$$

(3)

L'abaque précise aussi le type de cercle de glissement. Pour un angle  $\beta$  supérieur à  $53^\circ$ , il s'agit d'un glissement par un cercle en pied, et pour un angle plus petit, le type de cercle de glissement dépend de  $N_s$  et  $n_d$ .

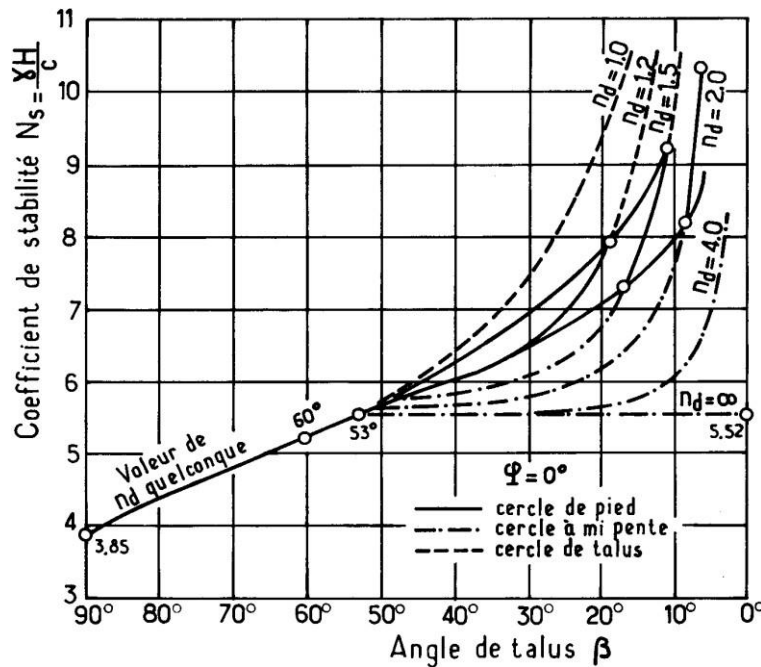


Figure 2 Abaque de Taylor pour un sol purement cohérent avec  $F_s = 1$

## 2. Stabilité d'un talus dans un sol cohérent - Méthode de Taylor

La méthodologie de calcul de  $F_s$  est comme suit :

1. à partir de l'équation (1), calculer le nombre de stabilité  $N_s$ ,
2. placer dans l'abaque de la figure 3 le point A ( $1/N_s, \varphi$ ) et tracer la droite joignant le point A à l'origine des axes,
3. cette droite coupe une courbe définie pour l'angle  $\beta$  donné, ce qui permet de définir un point d'intersection B( $\beta$ ).
4. le coefficient de sécurité est défini par le rapport des segments OA et OB présentés à la figure 3 :

$$F_s = \frac{OA}{OB}$$

(4)

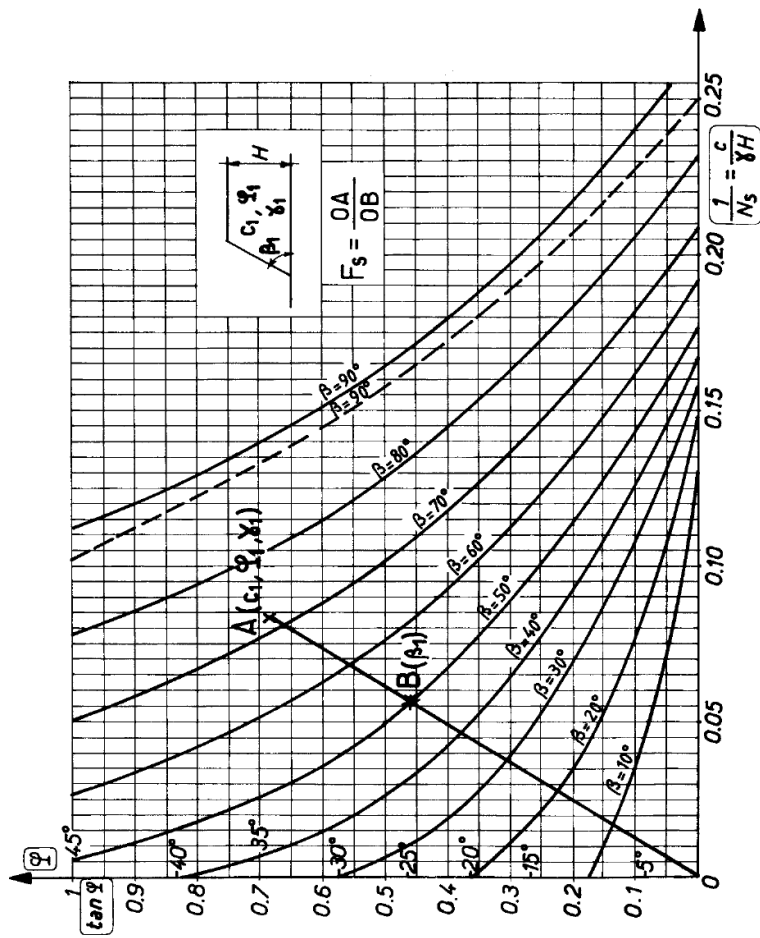
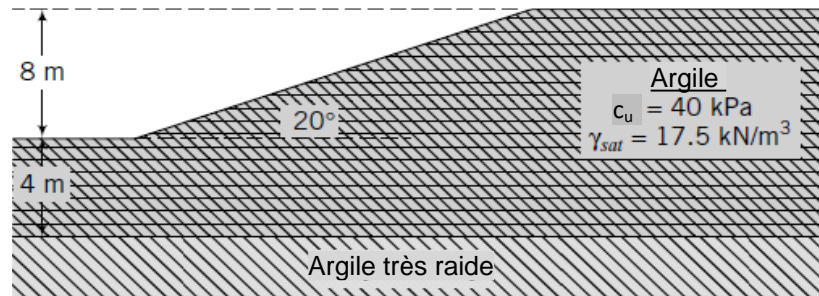


Figure 3 Abaque de Taylor - Biarez pour un sol cohérent

### Exercice 1

Déterminer le coefficient de sécurité de la pente représentée sur la figure ci-dessous en utilisant la méthode de Taylor.



### Solution

Détermination du coefficient de sécurité par la méthode de Taylor

Étape 1 : calcul  $n_d$

$H = 8 \text{ m}$ ,  $D = 4 \text{ m}$

$$n_d = \frac{D}{H} = \frac{4}{8} = 0.5$$

Étape 2 : déterminer  $N_s$

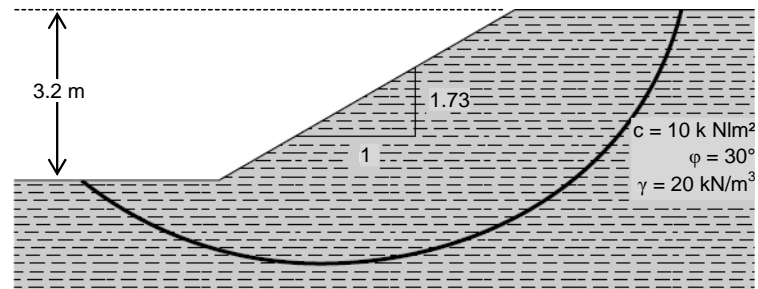
D'après la figure 2, pour  $\beta = 20^\circ$  et  $n_d = 0.5$ , on obtient  $N_s = 6.8$

Étape 3 : calcul  $F_s$

$$F_s = \frac{N_s c_u}{\gamma H} = \frac{6.8 \times 40}{17.5 \times 8} = 1.94$$

## Exercice 2

Déterminer le coefficient de sécurité de la pente représentée sur la figure ci-dessous en utilisant la méthode de Taylor-Biarez.



## Solution

Détermination du coefficient de sécurité par la méthode de Taylor-Biarez

Étape 1 : Calcul OA

Les coordonnées du point A sont :

$$\frac{1}{N_s} = \frac{c}{\gamma H} = \frac{10}{20 \times 3.2} = 0.15$$
$$\text{tg}\phi = \text{tg}30 = 0.57$$

Donc :

$$OA = \sqrt{(0.15)^2 + (0.57)^2} = 0.58$$

Étape 2 : Calcul OB

Le point B est l'intersection de OA avec la courbe correspondant à  $\beta = 60^\circ$

Les coordonnées du point B sont :

$$\frac{1}{N_s} = 0.097$$
$$\text{tg}\phi = 0.375$$

$$OB = \sqrt{(0.097)^2 + (0.375)^2} = 0.38$$

Donc:

Étape 2 : calcul  $F_s$

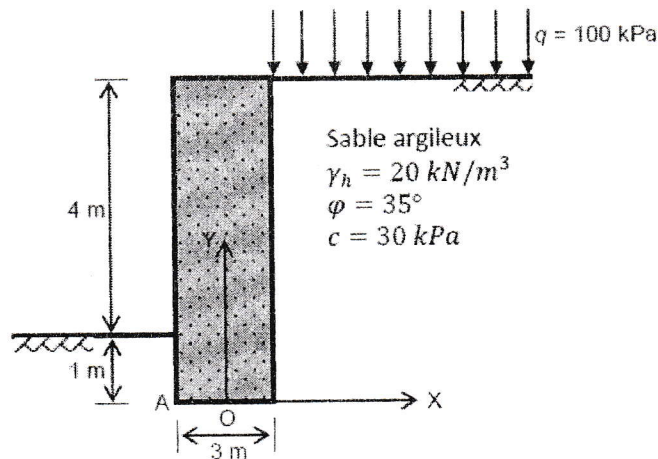
$$F_s = \frac{OA}{OB} = \frac{0.58}{0.38} = 1.52$$

## Série 6 : Stabilité des murs de soutènement rigides

### Exercice 1

Un mur vertical en béton armé, supposé parfaitement rugueux, a été conçu pour soutenir un remblai de sable argileux supportant un bâtiment à usage d'habitation (voir figure ci-dessous). Négliger les pressions à l'aval du mur.  $K_{ay} = 0.26$  ;  $K_{aq} = 0.266$

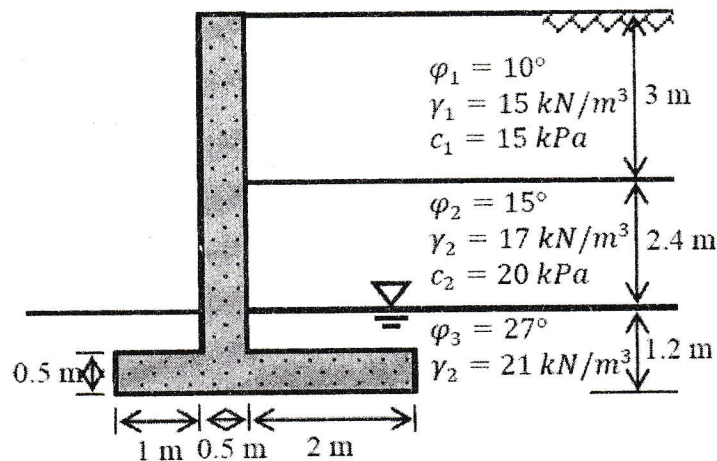
1. Vérifier la capacité portante du sol sous la base du mur.
2. Le glissement de la base est-il vérifié ?
3. Vérifier le renversement du mur par rapport au point A à la base du mur.



### Exercice 2

Un ouvrage de soutènement en béton armé retient un massif de sol pulvérulent dont les caractéristiques sont portées sur la figure ci-dessous.

1. Calculer la force de poussée dans chacune des couches.
2. Représenter le diagramme des contraintes.
3. Vérifier la stabilité au renversement en négligeant la butée du sol si le poids spécifique du béton est de  $25 \text{ kN/m}^3$ .
4. Vérifier la stabilité au glissement à la base du mur.
5. Calculer la résistance du sol de fondation.

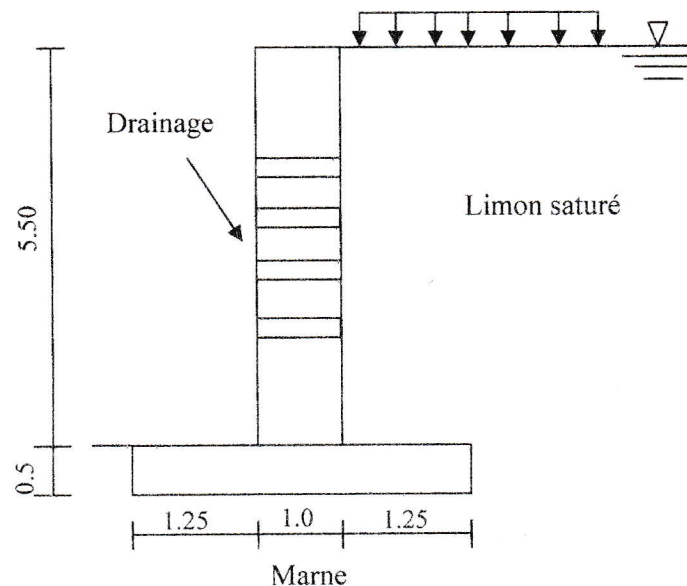


### Exercice 3

Soit un mur de soutènement autostable en béton armé selon la figure ci-dessous, le poids volumique du béton est  $25 \text{ kN/m}^3$ . Le mur repose sur une marne pour laquelle la contrainte admissible est  $200 \text{ kPa}$ . Il doit soutenir un remblai limoneux homogène et saturé caractérisé par  $\varphi = 20^\circ$ , une cohésion de  $10 \text{ kPa}$  et un poids volumique saturé de  $20 \text{ kN/m}^3$ . Le contact entre le sol et la paroi est considéré semi-rigide ( $\delta/\varphi = 0.67$ ).

La surface libre du remblai doit supporter une pression uniforme de  $60 \text{ kPa}$ . Les forces de poussée sur la semelle étant négligées. On demande de :

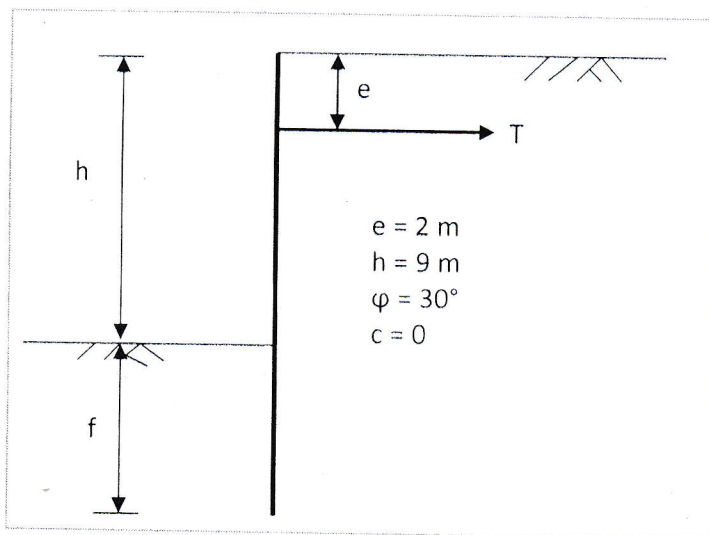
- 1) Définir les différentes actions s'appliquant sur le mur
- 2) Déterminer la résultante des forces appliquées sur le mur, son excentricité par rapport à la semelle et son inclinaison.  $K_{ay} = 0.442$  ;  $K_{aq} = 0.447$
- 3) Vérifier la stabilité au renversement du mur
- 4) Vérifier la stabilité au glissement à la base, sachant que la marne présente un angle de frottement interne  $\varphi' = 33^\circ$  associé à une cohésion  $c' = 10 \text{ kPa}$
- 5) Vérifier la portance de la semelle du mur à l'aide de la méthode de Meyerhof.



## Stabilité externe des murs flexibles de soutènement

### Exercice 1 :

Soit un terrain sec de poids volumique  $20 \text{ kN/m}^3$  dans lequel on souhaite établir un talus vertical de 9 m de hauteur soutenu par un rideau de palplanche ancré en tête et simplement buté en pied.



Pour traiter ce problème on prendra les contraintes appliquées à la paroi normales à celle-ci (hypothèses très simplificatrices et conservatives :  $\delta_a = \delta_p = 0$ )

- 1) Tracer le diagramme des contraintes qui s'exercent sur le rideau.
- 2) Déterminer la résultante de la poussée et de la butée en fonction de  $f$  (appliquer un coefficient de sécurité de 2 sur la butée). Le terrain est identique de part et d'autre du rideau. On suppose que l'application a lieu dans des conditions de déformation plane.
- 3) Dédire l'équation d'équilibre qui permet de calculer la fiche  $f$  de l'écran.
- 4) Si  $f = 3.4 \text{ m}$ , déterminer l'effort  $T$  dans le tirant.

### Exercice 2 :

Une palplanche avec tirants d'ancrage est battue dans un sol 1 (voir figure). Un remblai de 8 m de hauteur est réalisé derrière la palplanche. Les tirants d'ancrage, espacés de 2.5 m sont placés à 1.5 m sous la surface du remblai. Le niveau de l'eau derrière et devant le mur de palplanche est à 5.0 m au-dessous de la surface du remblai. On admettra ici que la palplanche est parfaitement lisse et que les forces de poussée (état actif) et les forces de butée (état passif) peuvent être déterminées par la méthode de Rankine.

- 1) Calculer et représenter sur un schéma, les contraintes s'exerçant sur la palplanche.
- 2) Pour calculer la fiche d'encastrement de la palplanche, on a d'abord divisé les forces de butée par un coefficient de sécurité égal à  $F_s$ , puis on a écrit l'équilibre autour du point A (point d'application de la force d'ancrage), des moments des forces stabilisantes et renversantes. Ce calcul a donné  $d = 5.0$  m. On demande de calculer le coefficient  $F_s$  qui a été considéré pour la butée.
- 3) Déterminer l'effort supporté par le tirant d'ancrage.

