

## Exercice #11 Fouille à talus

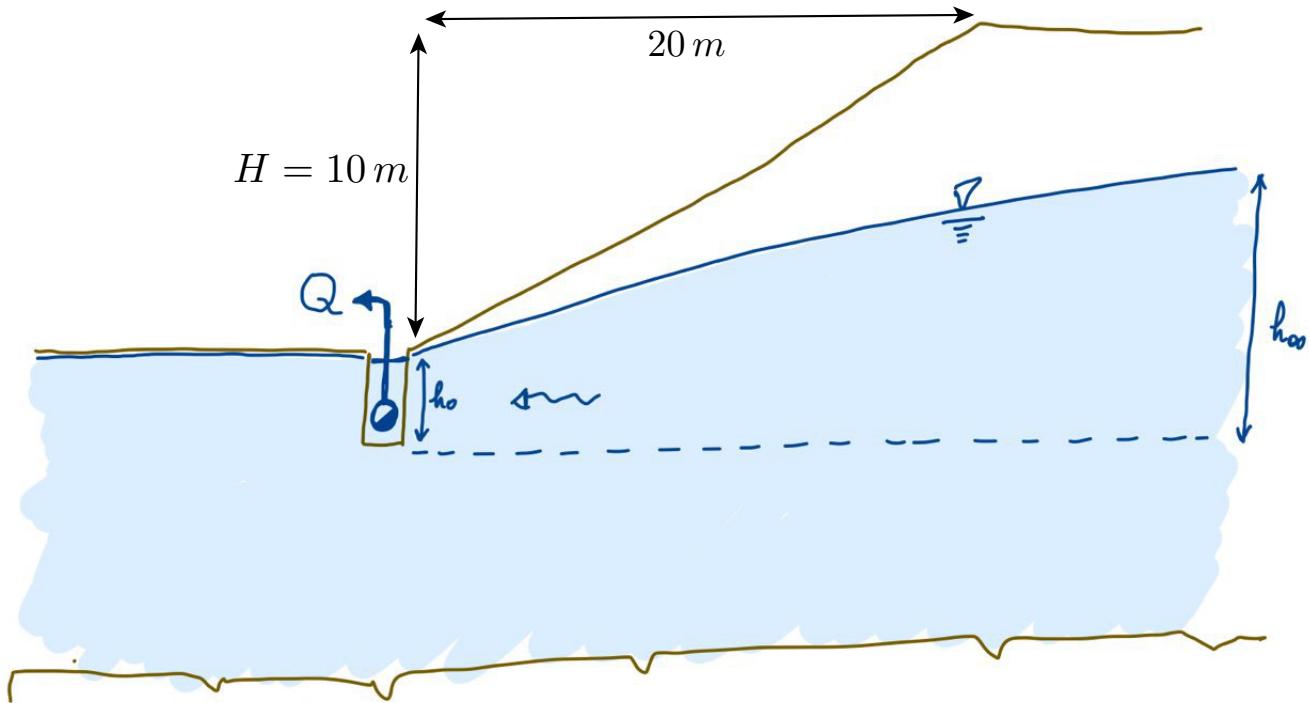


Figure 1: Fouille à talus - géométrie & système de pompage en pied.

On considère une fouille à talus (c.f figure 1) suffisamment longue pour se ramener à des calculs plan (2D). L'excavation implique la création d'une différence de hauteur de  $H=10$  mètres sur une longueur de 20 mètres. Les paramètres du sol sont données dans le tableau 1.

$\gamma$	21.3kN/m <sup>3</sup>
$c_u$	38kPa
$c'$	21kPa
$\phi'$	$20^\circ$
$k$	$10^{-7}\text{m/s}$

Table 1: Paramètres géotechniques du sol.

### 0.1 Rabbatement de la nappe

On s'intéresse tout d'abord au rabattement de la nappe. Vue la géométrie de la fouille, on fera un calcul 1D (et non en coordonnées polaires !) pour déterminer le débit à pomper en pied de talus afin de rabattre la nappe de

8,12 mètres à 0,0 mètre au-dessus du fond de fouille. Pour ce faire, un système de pompage sera construit à l'aide de puits d'une hauteur de 1 mètre. (c.f. figure 1). On fera l'hypothèse que l'influence du pompage devient nulle à une distance  $x_\infty$  de 60 mètres depuis le pied du talus (c.f. figure 1).

1. Pour une nappe libre, en suivant les hypothèses de Dupuit (écoulement horizontal), obtenir la relation entre le débit et la perte de charge selon  $x$
2. Calculer le débit à pomper (par mètre linéaire)
3. Calculer la répartition de la charge hydraulique selon  $x$ . Calculer notamment la charge hydraulique en pied de la fouille, à l'aplomb du sommet du talus, et à mi-chemin entre les deux.

## 0.2 Stabilité à court terme

Estimer la stabilité du talus à court terme.

## 0.3 Stabilité à long terme - abaques de Kérisel

On se propose dans un premier temps d'estimer le facteur de sécurité globale à long terme en utilisant les abaques de Kérisel (voir en Annexe).

1. Tout d'abord quel est l'angle  $\lambda$  de la nappe (par rapport à l'horizontale) compatible avec l'hypothèse d'un écoulement non-confiné de type Dupuit ?
2. Estimez à partir des abaques le facteur de sécurité en prenant soit  $\lambda = 0$ , soit  $\lambda = 3/5\beta$

## 0.4 Stabilité par la méthode des tranches

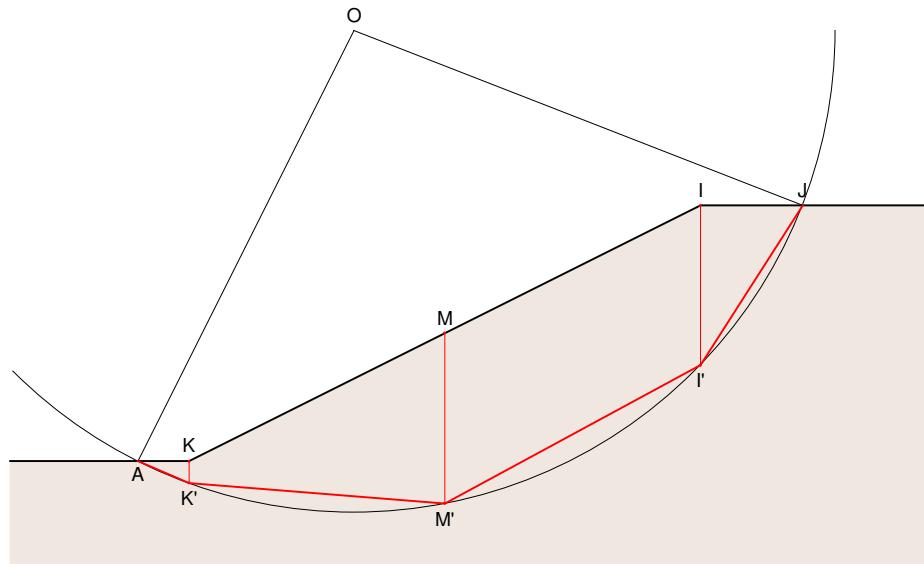


Figure 2: Calcul de stabilité à long terme - par la méthode des tranches.

On se propose de faire un calcul de stabilité par la méthode des tranches (méthode simplifiée de Fellenius - faisable à la main). On donne la géométrie de la surface de rupture en figure 2. On prendra en compte la surface de la nappe phréatique calculée préalablement.

Le plus simple est de faire un tableau (1 ligne par tranche) et de calculer le poids de la tranche, l'inclinaison de la surface de rupture de chaque tranches, les efforts normal et de cisaillement le long de la surface de rupture ainsi que la pression d'eau au milieu du segment de rupture. En adoptant un système de coordonnées cartésiennes

avec centre au point A de la figure 2, le tableau suivant, 2, montre les coordonnées des différents points décrivant la géométrie des tranches.

Point	x [m]	y [m]
A	0.000	0.000
K	2.000	0.000
M	12.000	5.000
I	22.000	10.000
K'	2.000	-0.863
M'	12.000	-1.662
I'	22.000	3.754
J	26.000	10.000

Table 2: Coordonnées des points de la Fig. 2.

## Correction Exercice #10 Fouille à talus

### 0.1 Rabbattement de la nappe

1. Selon l'hypothèse de Dupuit, l'écoulement d'eau se produit uniquement dans la direction horizontale.

On définit les variables suivantes:

$q$  := débit d'eau par unité de longueur [ $m^2/s$ ];

$v_x$  := vitesse de filtration de l'eau dans la direction x [ $m/s$ ];

$h$  := niveau piézométrique de la surface de la nappe phréatique [m];

$k$  := coefficient de perméabilité [ $m/s$ ];

$x$  := coordonnées avec l'origine ( $x_0$ ) au point de pompage [m];

$x_\infty$  := coordonnée de la position du niveau de la nappe phréatique non perturbée par l'excavation [m];

$h(x_0)$  := le niveau de la nappe phréatique dans le puits de pompage dans des conditions permanentes [m];

La variation du débit  $q$  selon x s'exprime comme:

$$\frac{dq}{dx} = \frac{d(v_x(x) \cdot h(x))}{dx}$$

avec Darcy

$$v_x = k \frac{dh(x)}{dx}$$

$$\frac{dq}{dx} = \frac{d}{dx} \left( k \frac{dh(x)}{dx} \cdot h(x) \right)$$

$$\frac{dq}{dx} = \frac{k}{2} \frac{d^2 h^2(x)}{dx^2}$$

Considérant que le débit le long du mouvement de filtration reste constant, on a :

$$\frac{dq}{dx} = 0 \Rightarrow \frac{d^2 h^2(x)}{dx^2} = 0 \Rightarrow q = const$$

$$q = v_x \cdot h(x) = \frac{k}{2} \frac{d h^2(x)}{dx}$$

L'intégration des deux membres de l'équation résulte en :

$$\int_{x_0}^{x_\infty} 2 \frac{q}{k} dx = \int_{x_0}^{x_\infty} \frac{d h^2(x)}{dx} dx$$

$$2 \frac{q}{k} (x_\infty - x_0) = h^2(x_\infty) - h^2(x_0)$$

$$q = \frac{k}{2} \frac{[h^2(x_\infty) - h^2(x_0)]}{x_\infty - x_0}$$

2. Le débit à pomper est donc égal à :

$$q = \frac{k}{2} \frac{[h^2(x_\infty) - h^2(x_0)]}{x_\infty - x_0} = 5.4112 \cdot 10^{-8} \frac{m^2}{s}$$

Note: La hauteur de référence pour la charge  $h(x)$  se trouve au fond de fouille.  $h(x_0)$  étant au fond du puit vaut donc  $h(x_0) = -h_p = -1[m]$ . En supposant qu'une pompe est placée tous les 100 m sur la longueur de l'excavation, chaque pompe doit extraire un débit égal à :

$$Q = 5.4112 \cdot 10^{-5} \frac{\text{litre}}{\text{s} \cdot \text{m}} \cdot 3600 \frac{\text{s}}{\text{heure}} \cdot 100\text{m} = 19.48 \frac{\text{litre}}{\text{heure}}$$

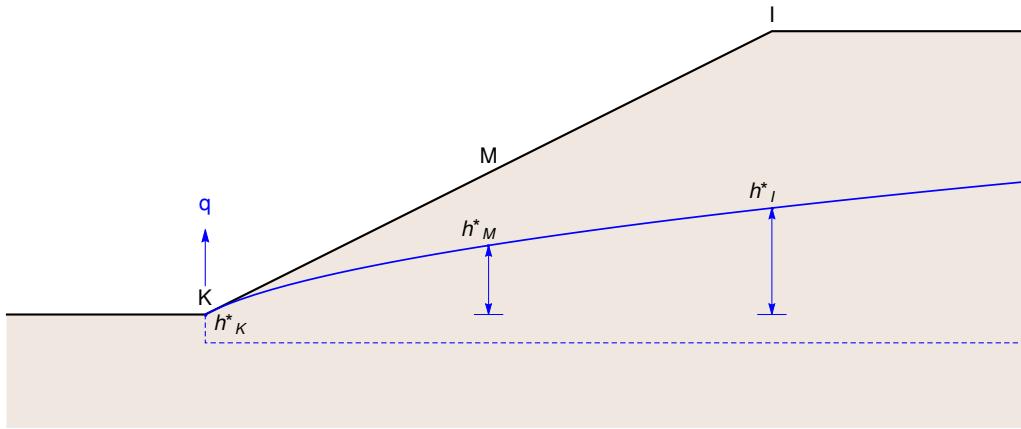


Figure 3: Tendance de la nappe phréatique selon l'hypothèse de Dupuit.

Point	x [m]	h*[m]
Pied de la fouille (K)	0.000	0.000
M	10.000	2.438
à l'aplomb du sommet de l'excavation (I)	20.000	3.759

Table 3: Coordonnées par rapport au point de pompage.

3. A partir des formules obtenues précédemment, on obtient la position de la surface phréatique  $h^*(x)$ . Notez que la valeur de  $h(x_0)$  a été soustraite pour obtenir la position de la surface phréatique par rapport au pied de l'excavation :

$$h^*(x) = \sqrt{h^2(x_0) + 2 \frac{q(x - x_0)}{k}} - h(x_0)$$

## 0.2 Stabilité à court terme

La formule suivante est appliquée (valable à court terme - matériau purement cohésif):

$$F_s \approx \frac{4}{\tan(\beta/2)} \frac{c_u}{\gamma H} = 3.023$$

$\beta$  est l'angle d'inclinaison de la pente, obtenu comme suit :

$$\tan(\beta) = \frac{10m}{20m} = \frac{1}{2} \rightarrow \beta = \arctan\left(\frac{1}{2}\right)$$

## 0.3 Stabilité à long terme selon Caquot-Kérisel

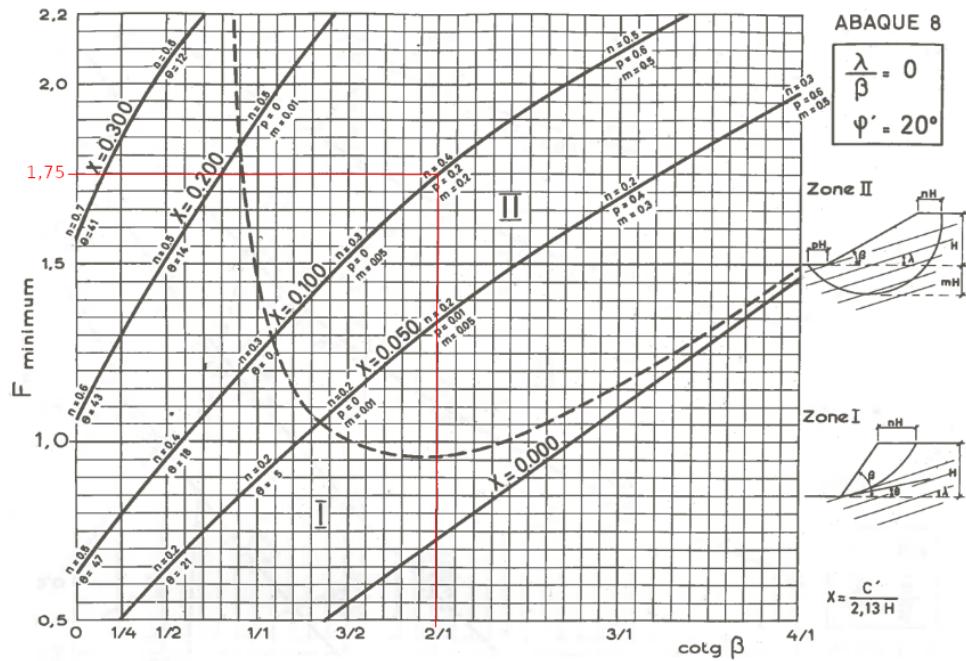
Pour utiliser l'abaque de Caquot-Kérisel, il est nécessaire d'estimer la valeur de X :

$$X = \frac{c'}{\gamma H} = 0.0986 \rightarrow X \approx 0.1$$

La géométrie du projet le montre :

$$\cot(\beta) = \frac{20m}{10m} = 2$$

1. L'hypothèse de Dupuit consiste à supposer que l'écoulement ne se produit que dans le sens horizontal, donc strictement cela implique  $\lambda = 0$ . Bien sur cette hypothèse n'est pas très juste en pied de talus. Seul un vrai calcul bi-dimensionnel permettrait d'estimer un angle  $\lambda$  moyen réaliste.

Figure 4: Abaque n°8 -  $\lambda = 0$ .

2. Pour  $\lambda = 0$  de l'abaque de la figure 4 vous obtenez  $F_s = 1,75$  tandis que pour  $\lambda/\beta = 3/5$  de l'abaque de la figure 5 vous obtenez  $F_s = 1,55$ . Il est à noter que l'hypothèse  $\lambda = 0$  n'est pas du côté de la sécurité bien évidemment (l'écoulement ayant un effet déstabilisateur).

#### 0.4 Méthode des tranches

Dans la figure 6, la tendance des eaux souterraines calculée à partir de l'hypothèse de Dupuit a été superposée à la division en tranches qui a été choisie. L'intérieur de chaque segment, on suppose, dans la première approximation, que le niveau de la nappe phréatique varie de façon linéaire (ligne en pointillés sur la figure 6).

Pour calculer toutes les forces en jeu, il convient d'utiliser la nomenclature des tranches présentée à la figure 7.

Pour la tranche  $i$ , les quantités suivantes seront calculées (une profondeur d'un mètre de longueur a été considérée à l'extérieur du plan d'analyse):

$W_i$  := Poids de la tranche  $i$  (ou poids submergé si sous le niveau de la nappe phréatique) [ $kN$ ];

$L_i$  := Longueur du segment de glissement  $i$  (elle se rapproche de la face inférieure de la tranche individuelle) [ $m^2$ ];

$\alpha_i$  := Angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale de la face inférieure de la tranche  $i$ ;

$N_i$  :=  $W_i \cdot \cos(\alpha_i)$  [ $kN$ ]

$T_{Mi}$  :=  $W_i \cdot \sin(\alpha_i)$  [ $kN$ ]

$U_i$  := Résultant des forces de pression de l'eau agissant sur la surface de glissement [ $kN$ ];

$N'_i$  :=  $N_i - U_i$  [ $kN$ ]

$T_{Ri}$  :=  $c'_i \cdot L_i + N'_i \tan(\phi')$  [ $kN$ ]

Les valeurs numériques des quantités qui viennent d'être définies sont données dans le tableau 4:

Attention : pour le calcul de  $W_{ib}$  on suppose  $\gamma_{sat} = \gamma$  pour simplifier.

Le facteur de sécurité calculé selon la méthode de Fellenius (méthode des tranches ordinaire) est égal à :

$$F_s = \frac{\sum_i T_{Ri}}{\sum_i T_{Mi}} = \frac{\sum_i c'_i \cdot L_i + N'_i \tan(\phi')}{\sum_i T_{Mi}} = \frac{\sum_i c'_i \cdot L_i + (N_i - U_i) \tan(\phi')}{\sum_i T_{Mi}} = 1.5616$$

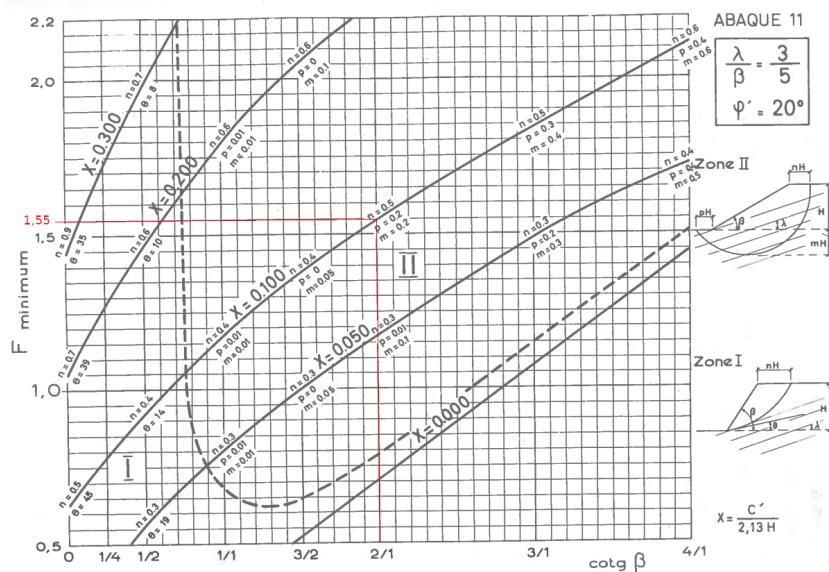


Figure 5: Abaque n°11 -  $\lambda/\beta = 3/5$ .

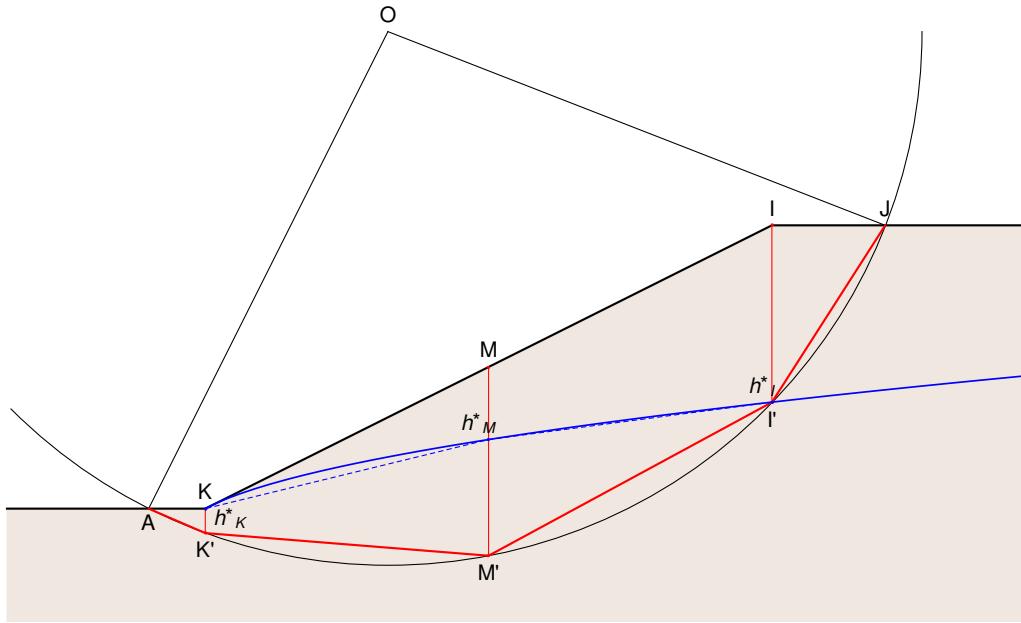


Figure 6: Schéma de vérification utilisant la méthode des tranches.

Tranche	$W_i[kN]$	$W_{ia}[kN]$	$W_{ib}[kN]$	$L_i[m^2]$	$\alpha_i$ (radians)	$N_i[kN]$	$T_{Mi}[kN]$	$U_i[kN]$	$N'_i[kN]$	$T_{Ri}[kN]$
1	18.3705	-	-	2.17804	-0.407137	16.8688	-7.27437	9.39238	7.4765	48.46
2	801.344	272.813	528.531	10.0319	-0.0797737	798.796	-63.8584	248.928	549.868	410.805
3	1374.66	937.984	436.679	11.3725	0.496383	1208.76	654.681	233.152	975.603	593.914
4	266.068	-	-	7.41682	1.00117	143.495	224.057	0.00	143.495	207.981

Table 4: Résultats numériques.

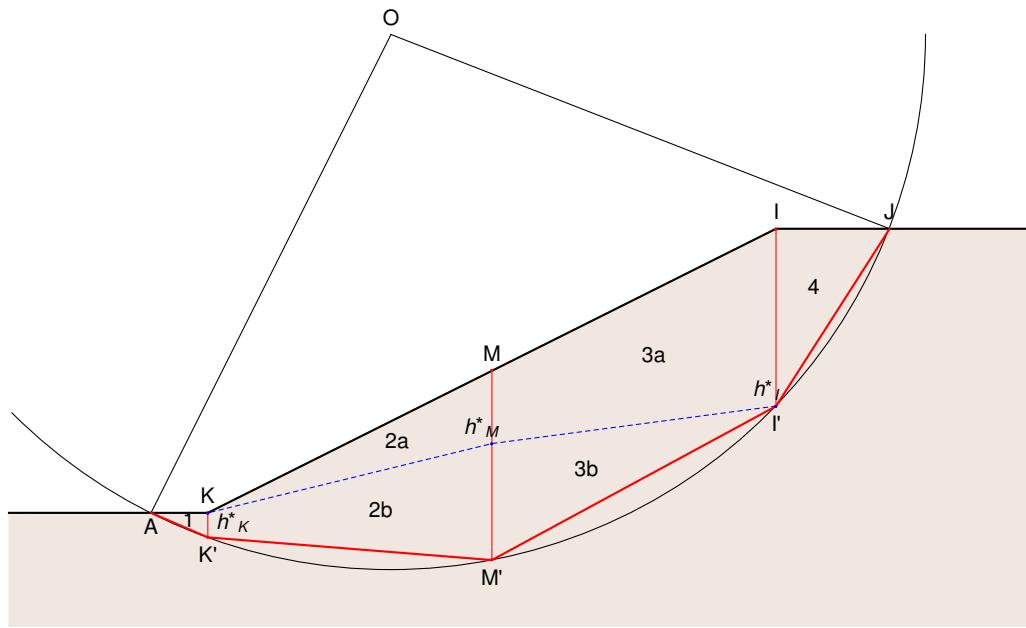


Figure 7: Nomenclature des tranches.

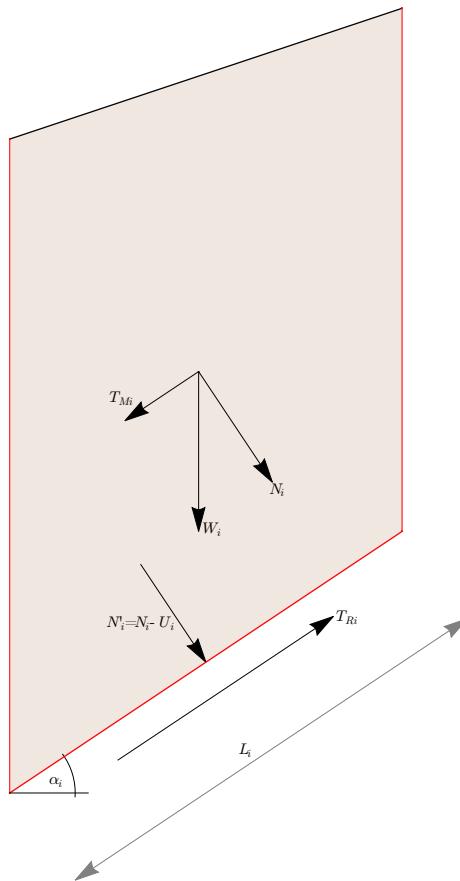


Figure 8: Description des forces exercées sur la tranche.

En utilisant la méthode de Bishop simplifiée, on doit résoudre une équation non linéaire pour le coefficient de sécurité  $F_s$ :

$$F_s = \frac{\sum_i \frac{c'_i \cdot L_i \cdot \cos(\alpha_i) + (W_i - U_i \cos(\alpha_i)) \tan(\phi')}{\cos(\alpha_i) \cdot \left(1 + \frac{\tan(\alpha_i) \tan(\phi')}{F_s}\right)}}{\sum_i W_i \sin(\alpha_i)}$$

L'initialisation d'un schéma itératif (par exemple celui de Newton), avec la valeur initiale obtenue avec la méthode de Fellenius  $F_s = 1.6$ , converge vers la valeur:

$$F_s^{simp.\text{Bishop}} = 1.701$$