

Chapitre VI : STABILITE DES DIGUES

Introduction

1. Méthode des tranches

1.1. Hypothèses de calcul

1.2. Principe de calcul

1.3. Paramètres de calcul

1.4. Coefficient de sécurité

1.5. Détermination de la zone des cercles critiques de glissement

2. Méthode de Bishop (1955)

3. Méthode de Janbu (1968)

Introduction :

La définition du coefficient de sécurité des talus à l'égard de la rupture demeure une des questions les plus controversées de la mécanique des sols. Plusieurs approches ont été proposées sans pour autant qu'il ne soit possible de trouver une synthèse pleinement satisfaisante. Le débat reste donc ouvert !

En 1921, fut la découverte de la méthode des tranches dite méthode suédoise, confirmé par W. Fellenius (1927), puis améliorée en 1936 pour calculer la stabilité d'un talus pour la détermination du cercle critique. Par la suite Bishop (1955), Bishop-Morgenstern (1960) Morgenstern-Price (1965), Spencer (1967), Janbu (1968) et de l'*U.S. Army Corps of Engineers* (1970) ont donné des méthodes plus avancées de calcul suivant la nature des hypothèses de calculs sur les tranches du massif et sur la pression inertielle.

La vérification de la stabilité doit s'effectuer dans les situations suivantes :

- En fin de construction (talus amont et talus aval)
- En fonctionnement normal (talus aval)
- En Vidange rapide (talus amont)

1. Méthode des tranches :

1.1. Hypothèses de calcul :

Par définition, le coefficient F de sécurité au glissement est le rapport entre le moment cumulé des forces résistantes et celui des forces motrices. Le cercle qui conduit au coefficient minimal est le cercle critique. Il conduit au coefficient de sécurité du talus (figure 11).

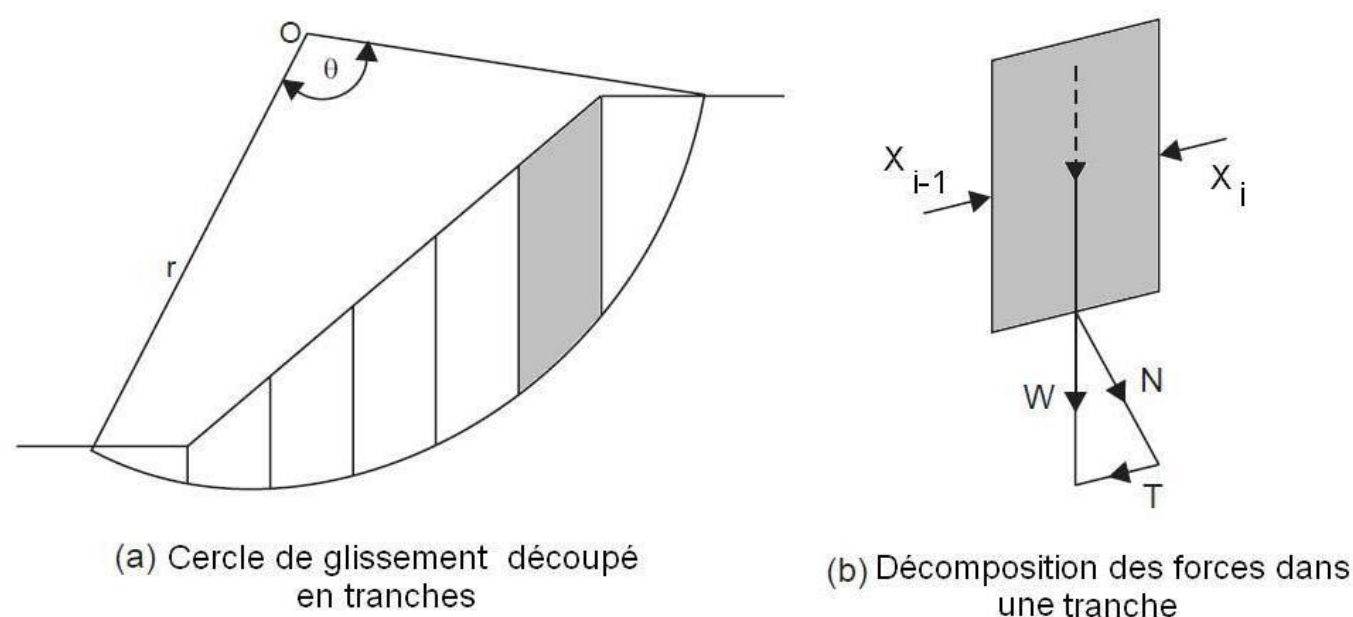


Figure 44 : Définition du cercle de glissement par la méthode des tranches.

Pour un remblai à construire, le calcul doit être mené d'une part à court terme : caractéristiques du sol C_u et ϕ_u qui sont obtenues à partir de l'essai triaxial non consolidé non drainé (UU) interprété en contraintes totales. Et d'autre part, à long terme : caractéristiques c' et ϕ' obtenues à partir de l'essai consolidé, drainé (CD) ou de l'essai consolidé, non drainé (CU) interprété en contraintes effectives.

Le principe de la méthode est fondé sur les hypothèses suivantes :

- La rupture se produit d'une coupe sur la surface unique de glissement
- Les courbes de glissements sont des arcs de cercles.
- Le mouvement de la surface de terre est assimilé à une rotation autour du centre de cercle de glissement.
- Le coefficient de sécurité sera le rapport des mouvements par rapport au centre des cercles, des forces stabilisatrices et des forces déstabilisatrices.
- Les interactions entre les tranches sont équilibrées verticalement et horizontalement (Pas d'interaction : $X_{n+1} = X_n$ et $Z_{n+1} = Z_n$).

1.2. Principe de calcul :

Il faut effectuer le bilan des forces pour une tranche (i) du cercle de glissement "le plus critique", qui comprend les sollicitations suivantes :

- Poids de la tranche W_i : qui comprend le sol et de l'eau en présence de la ligne phréatique).
- Les forces de réaction du sol de composante tangentielle T_i et normale N_i .
- Les pressions interstitielles.
- Les forces latérales d'interaction inter-tranche X_{i-1} et X_i , sont négligeables (Figure12).

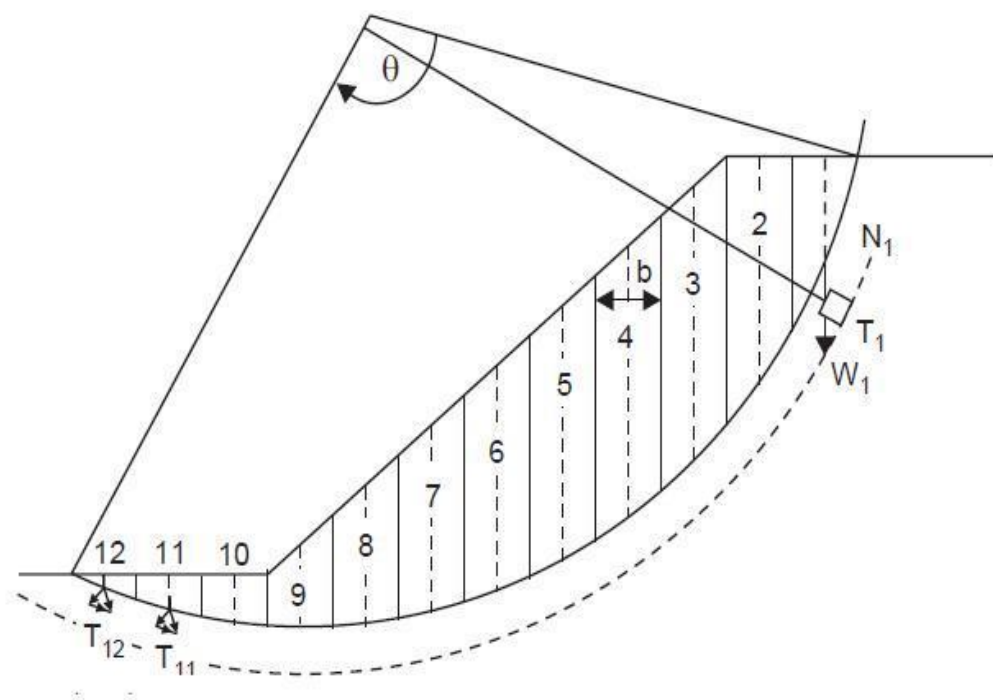


Figure N°45 : Principe de découpage des tranches d'un cercle de glissement

Soit l_i , la portion de cercle de glissement interceptée par la tranche d'ordre(i) que nous considérons.

La résolution analytique des équations est fastidieuse, il est alors préférable de prendre des hypothèses simplificatrices concernant les efforts inter-tranches.

FELLENIOUS (1936) propose que $X_{i-1} = X_i$, par contre Bishop, considère que seulement la résultante des projections sur la verticale des forces inter tranches est nulle.

Dans la méthode FELLENIUS (1936), l'effort normal résultant de l'action d'une tranche l_i se ramène à la composante normale de poids W_i à laquelle il faut tenir compte de la pression interstitielle.

1.3. Paramètres de calcul :

- **Poids Propre de la tranche :**

$$W_i = b \sum_{i=1}^n (\gamma_i h_i)$$

W_i : poids propre de la tranche

b : largeur d'une tranche ($b= 0,1R$)

h_i : hauteurs des tranches.

γ_i : densité du massif correspondant (en dessous, au-dessus de la ligne phréatique et des fondations).

- **Le poids volumique du sol d'humidité naturelle :**

$$\gamma_{sh} = (1-n)\gamma_{sp} (1+\omega)$$

γ_{sp} : poids volumique spécifique du sol

ω : teneur en eau en fraction de l'unité.

- **Le poids volumique du sol saturé :**

$$\gamma_{ss} = (1-n)(\gamma_{sp} - \gamma_w)$$

n : porosité du sol en fraction de l'unité

γ_w : poids volumique de l'eau

- **Le poids volumique déjaugé :** On l'utilise dans le cas d'une vidange rapide :

$$\gamma' = \gamma_{ss} - 1$$

- **Le poids " W_i " :** c'est une force qui présente deux composantes :

$$N_n = W_i \cos \alpha_i = b\gamma_s \sum_{i=1}^n h_i \cos \alpha_i \quad \text{et} \quad N_n = W_i \sin \alpha_i = b\gamma_s \sum_{i=1}^n h_i \sin \alpha_i$$

N_n : composante normale stabilisatrice.

T_n : composante tangentielle déstabilisatrice au cercle de glissement.

avec :

$$\text{Sin} \alpha = \frac{\text{Numéro d'ordre de la section}}{\text{Nombre total des tranches}}$$

- **Pression interstitielle :**

$$U_i = \gamma_w h_i dl$$

dl : représente la longueur de l'arc délimitant la base de la tranche.

- **Force de cohésion :**

$$F_c = C \cdot dl$$

$$dl = \frac{2\pi \cdot R \cdot \beta_i}{360^\circ} \cdot \frac{b}{\cos \alpha}$$

β_i : Angle au centre des tronçons de la courbe de glissement.

C : cohésion du sol considéré.

- **Forces de frottement :**

$$T_f = C \cdot dl_i + (N - U_i dl_i) \operatorname{tg} \phi$$

ϕ : angle de frottement interne qui dépend de la nature du sol et de la disposition de la surface de glissement par rapport à la ligne phréatique

- **Force sismique :**

$$T_n' = a W_i$$

1.4. Coefficient de sécurité :

L'équilibre limite global en termes de moments résultant s'effectue par rapport au centre O du cercle de rupture de R. On compare les efforts de cisaillement réellement appliqués τ et les efforts de cisaillement mobilisables τ_f :

$$F_s = \frac{\sum M_{/o} \text{Stabilisant}}{\sum M_{/o} \text{déstabilisant}}$$

Le coefficient de sécurité sera calculé pour les différents types de fonctionnement de la retenue.

- **Retenue pleine :**

$$\text{Sans séisme : } F_s = \frac{\sum [C \cdot dl_i + (N - U_i dl_i) \operatorname{tg} \phi]}{\sum W_i \sin \alpha} \geq F_{adm}$$

$$\text{Avec séisme : } F_s = \frac{\sum [C \cdot dl_i + (N - U_i dl_i) \operatorname{tg} \phi]}{\left[\sum \left(\frac{1}{R} \right) W_i \cdot a \cdot dn_i + W_i \sin \alpha \right]} \geq F_{adm}$$

dn_i : distance entre centre de gravité de la tranche et le centre de glissement du cercle de glissement.

- **Vidange rapide :**

$$\text{Sans séisme : } F_s = \frac{\sum [C \cdot dl_i + (N) \cdot \text{tg} \phi]}{\sum W_i \sin \alpha} \geq F_{adm}$$

$$\text{Avec séisme : } F_s = \frac{\sum [C \cdot dl_i + (N) \cdot \text{tg} \phi]}{\left[\sum \left(\frac{1}{R} \right) W_i \cdot a \cdot dn_i + W_i \sin \alpha \right]} \geq F_{adm}$$

Dans le cas ou les recharges sont en gravier $C \approx 0 \Rightarrow C_i dl_i = 0$ $C \approx 0 \Rightarrow C_i dl_i = 0$

Tableau N°05 : Coefficients de stabilité admissibles en fonction de la classe de l'ouvrage et des combinaisons de charges

Combinaison des charges	Valeurs des coefficients admissibles			
	I	II	III	IV
Permanent	1,3-1,2	1,2-1,15	1,15-1,10	1,10-1,05
Particuliers	1,1-1,05	1,10-1,05	1,05	1,05

1.5. Détermination de la zone des cercles critiques de glissement

Fondéev recommande de disposer les centres de glissements dans une zone déterminée. Il s'agit de disposer les centres de courbes de glissement "O" dans la zone limitée définie par MZZ1M1 de la figure ci-dessous dont la construction est en fonction des fruits de talus de la digue conformément aux valeurs du tableau ci-dessous :

Tableau N°06 : Valeurs des coefficients k_1 et k_2 pour le choix de la zone des cercles de glissement

Fruit du talus m	1	2	3	4	5	6
$\frac{BM}{H_B} = k_1$	0,75	0,75	1,00	1,50	2,20	3,00
$\frac{BZ}{H_B} = k_2$	1,50	1,75	2,30	3,75	4,80	5,50

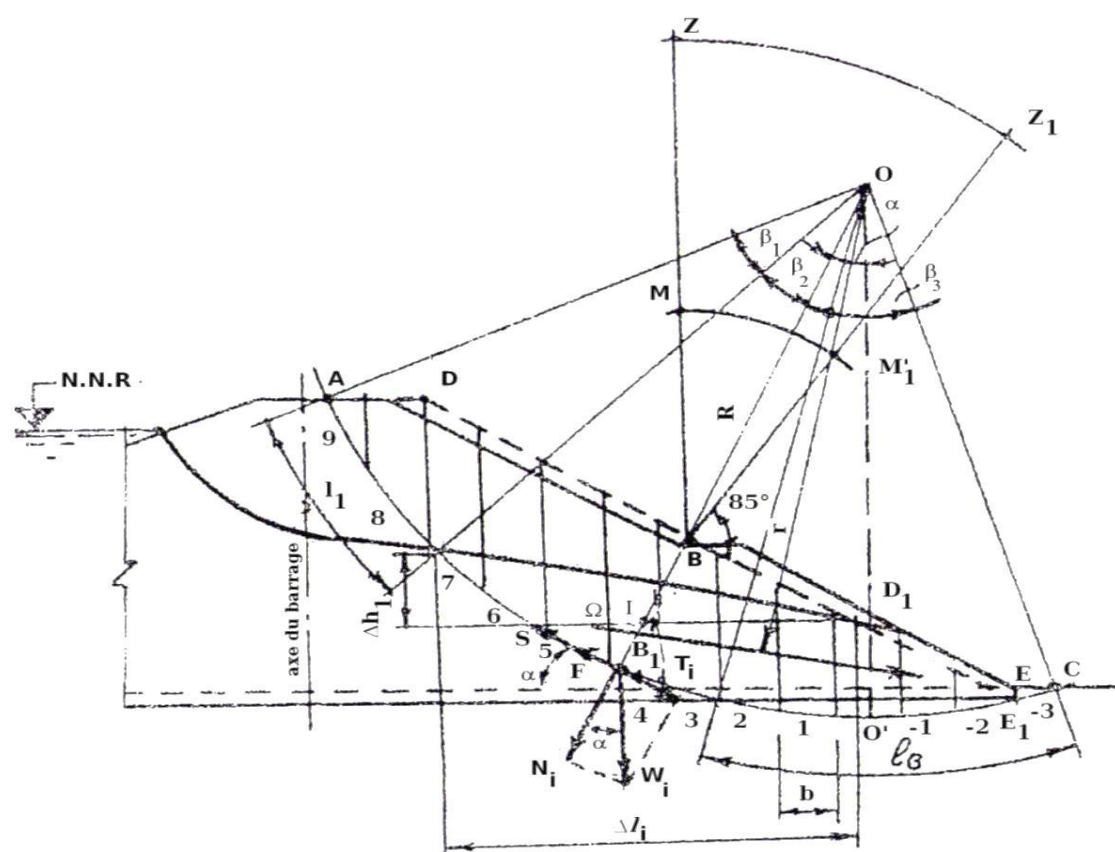


Figure N°46 : Schéma illustrant le principe de la méthode des tranches en application de la méthode de FONDEEV.

La méthodologie du tracé et de détermination du centre du cercle critique est effectuée comme suit :

- Tracer le profil en travers suivant une échelle, On peut se limiter au tracé du talus seul.
- Tracer deux lignes au milieu (point B) du talus moyen où :
 - La première ligne est verticale
 - La seconde ligne avec un angle de 85° par rapport à la ligne du talus,
- Suivant les valeurs du tableau ci-dessus on détermine les rayons $\mathbf{BM}=\mathbf{k}_1\mathbf{H}_b$ et $\mathbf{BZ}=\mathbf{k}_2\mathbf{H}_b$ et former une zone $\mathbf{MZZ}_1\mathbf{M}_1$ par \mathbf{ZM} et $\mathbf{Z}_1\mathbf{M}_1$ en prenant comme centre le point B.
- Disposer dans cette zone les centres de glissement de façon à ce que les courbes de glissement se trouvent dans les limites des talus. En indiquant le centre de glissement "O " on trace la courbe circulaire AC de rayon R.
- on partage la zone limitée par courbe de glissement et le contour de la digue en tranches verticales d'épaisseur $b= 0,1R$. En Désignant les tranches portant les numéros négatives et positives à gauche et à adroite de la référence 0.

2. Méthode de Bishop (1955)

Cette méthode est plus générale que celle de FELLENIUS (1955), car on considère uniquement l'interaction inter-tranches verticale est nulle ($Z_{n-1} = Z_n$). Par contre on admet que l'interaction latérale $X_{i-1} \neq X_i$. Ce qui permet d'obtenir une formulation implicite qui sera résolue par des itérations successives.

$$F_s = \frac{\sum \left[(C \cdot dl_i + ((W_i \cos \alpha_i + \Delta X) - U_i dl_i) \operatorname{tg} \phi) \cdot \frac{1}{\cos \alpha_i \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha_i \operatorname{tg} \phi_i}{F} \right)} \right]}{\sum W_i \sin \alpha} \geq F_{adm}$$

Le calcul s'opère par itération. On évalue par la méthode de Fellenius une première valeur de $F=F_0$. La méthode de bishop est considérée plus précise (taux d'erreur à l'ordre de 1%). Cependant, pour alléger les calculs, il est recommandé de détermine d'abord le cercle le plus critique par la méthode de Fellenius.

3. Méthode de Janbu (1968) :

C'est une méthode qui admet des hypothèses identiques à ceux de la méthode Bishop. Il s'agit d'introduire d'une correction à partir d'une formulation empirique que coefficient de

sécurité obtenue par Bishop. La relation est itérative dont la première valeur est déterminée par celle de Bishop et qui s'écrit alors :

$$F_s = \frac{\sum \left[(C \cdot dl_i + ((W_i \cos \alpha_i + \Delta X) - U_i dl_i) \operatorname{tg} \phi) \cdot \frac{1}{\cos^2 \alpha_i \left(1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha_i \operatorname{tg} \phi_i}{F} \right)} \right]}{\sum W_i \operatorname{tg} \alpha_i} \geq F_{adm}$$

Ensuite une correction est portée à la valeur trouvée précédemment par l'introduction de la valeur de λ :

$$F_{\text{corrigé}} = \lambda \cdot F_{\text{calculé}}$$

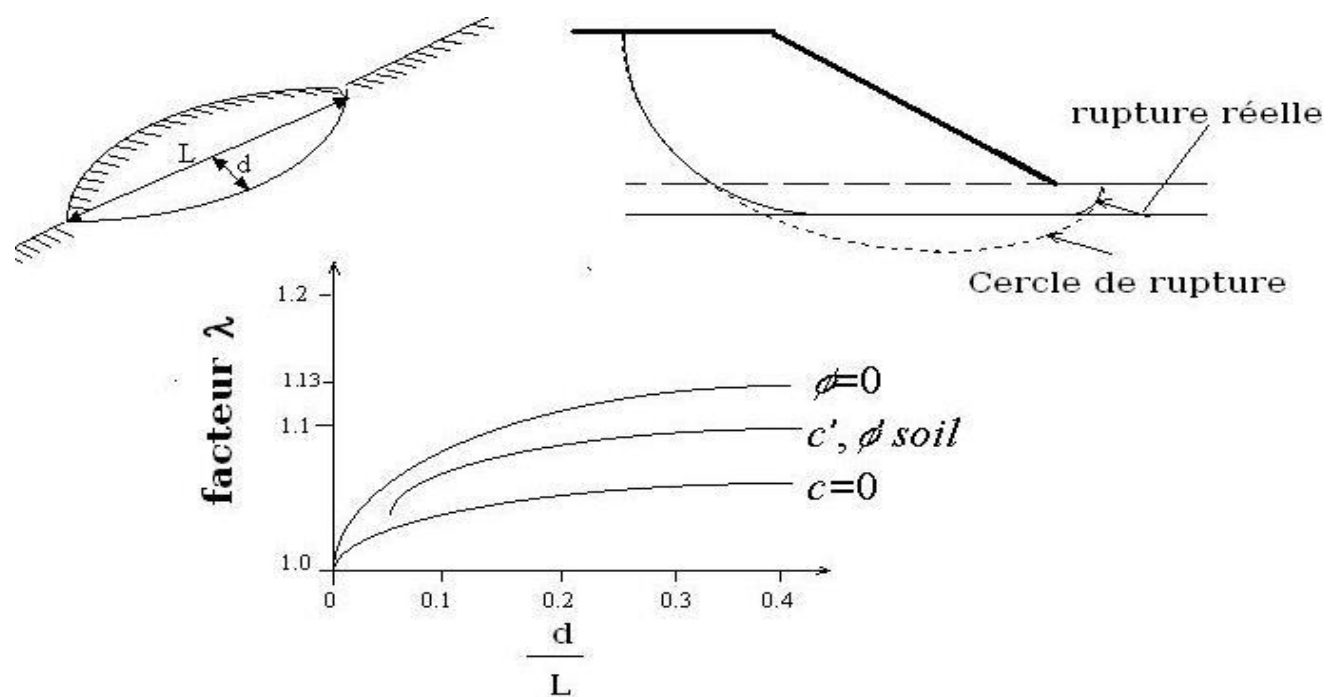


Figure N°47 : Coefficient de correction selon la méthode Janbu (1968)