

Chapitre I : Stabilité des pentes et des Talus.

Introduction :

La stabilité des pentes intéresse aussi bien les pentes naturelles que les Talus créés par l'homme.

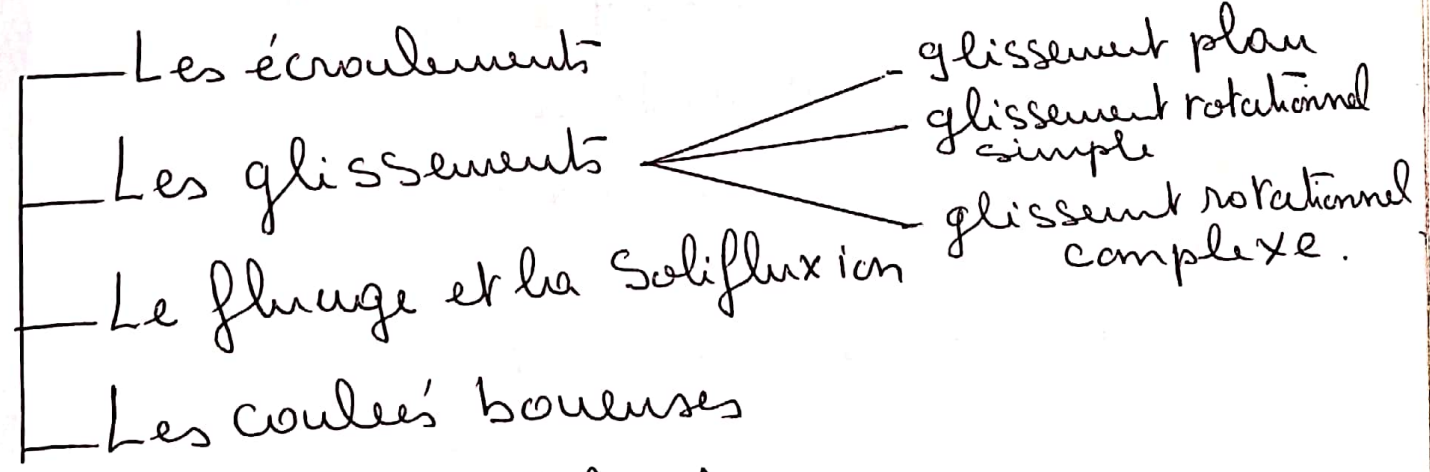
Les glissements de Terrain sont généralement spectaculaires et parfois très meurtriers,

Toute étude de stabilité doit être précédée d'une reconnaissance géologique très fine qui permet de parvenir à mettre en évidence des facteurs pas toujours quantifiables, influant lourdement sur le coefficient de sécurité réel.

I - Classification des mouvements de Terrain

I.1 - Pentes naturelles

On distinguera :



I.2 - Talus artificiels :

Les Talus artificiels sont essentiellement affectés par des glissements et parfois par des phénomènes de fluage.

- On peut les classer en fonction des Types d'ouvrages: -2-

- Talus en déblai,
- Talus en remblai sur sol non compressibles,
- Talus en remblai sur sol compressible,
- Glissement généralisé sous un écran ou un ouvrage de soutènement,
- Stabilité des digues et barrage en terre.

II - Description des principaux Types de mouvements

II.1 - Écroulement et chutes de pierres.

Les écroulements concernent les masses rocheuses, ils sont spectaculaires et dangereux car soudain.

II.2 - Glissements.

Les glissements affectent les sols et sont fréquents, c'est un déplacement généralement lent. Les vitesses de rupture peuvent être très variables.

II.2.1 - Glissement plan.

En général, la ligne de rupture suit une couche mince de mauvaise caractéristique sur laquelle s'exerce d'ailleurs souvent l'action de l'eau. Une telle couche est appelée: couche saumée (fig 1)

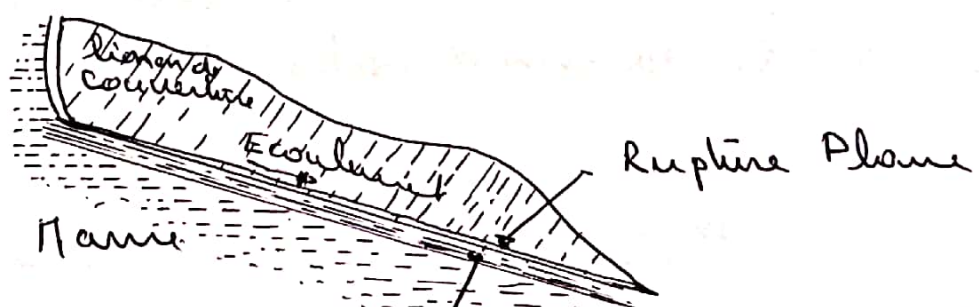
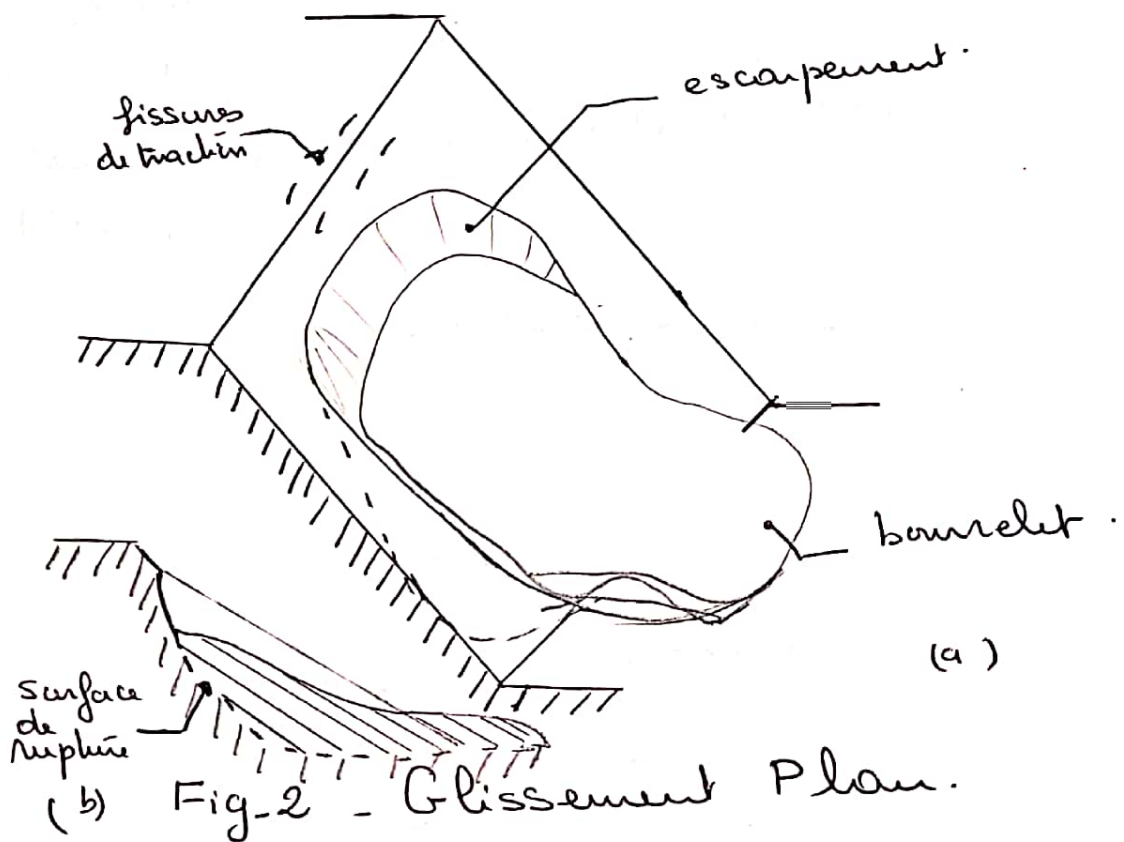


Fig 1 - Glissement Plan

1-2-2. Glissement rotationnel simple
 Ce type de glissement est fréquent. La surface de rupture a une forme simple et peut être assimilée à un cylindre.



On distingue :

- En tête des fissures de traction,
- Un escarpement correspondant au départ de la surface de glissement.
- à la base, un bourrelet formé par des matières glissées.

Dans la plupart des cas, la ligne de rupture peut être assimilée à un cercle, d'où le nom de glissement circulaire.

1-2-3. Glissement rotationnel complexe.

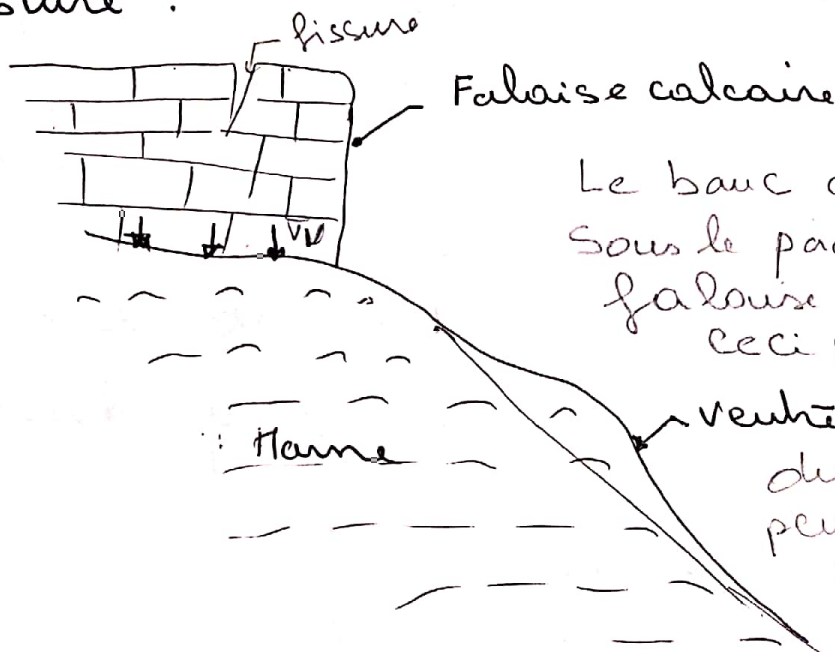
Il s'agit de glissement multiples « encaînés »

Les uns dans les autres.

II. 3. Fluage et Solifluxion.

II. 3. 1. Fluage.

Le fluage correspond à des mouvements lents dus à des sollicitations proches de la rupture (domaine plastique). L'état ultime peut être, soit la stabilisation, soit la rupture.



Le banc de terre glisse sous le poids de la falaise calcaire, ceci peut entraîner une fissuration du banc calcaire peu déformable et un risque d'éroulement de la falaise.

Exemple de Fluage.

II. 3. 2. Solifluxion.

La solifluxion est un cas particulier de fluage. Il s'agit d'un phénomène dû aux variations de volume du sol au cours des saisons (gel et dégel en montagne, alternance de saisons sèches et pluvieuses). Les mouvements alternés, lors qu'ils affectent des pentes conduisent à une reptation vers l'aval.

II-4. Coulées boueuses:

Les coulées boueuses sont dues à des écoulements d'eau importants transportant des matériaux solides. Elles se produisent essentiellement en montagne.

II-5. Talus en déblai et Talus en remblai sur Sol non compressibles.

Les ruptures ont, d'une façon générale, l'allure de glissements rotationnels circulaires.

on distingue :

- Les cercles de Talus.
- Les cercles de pied,
- Les cercles profonds.

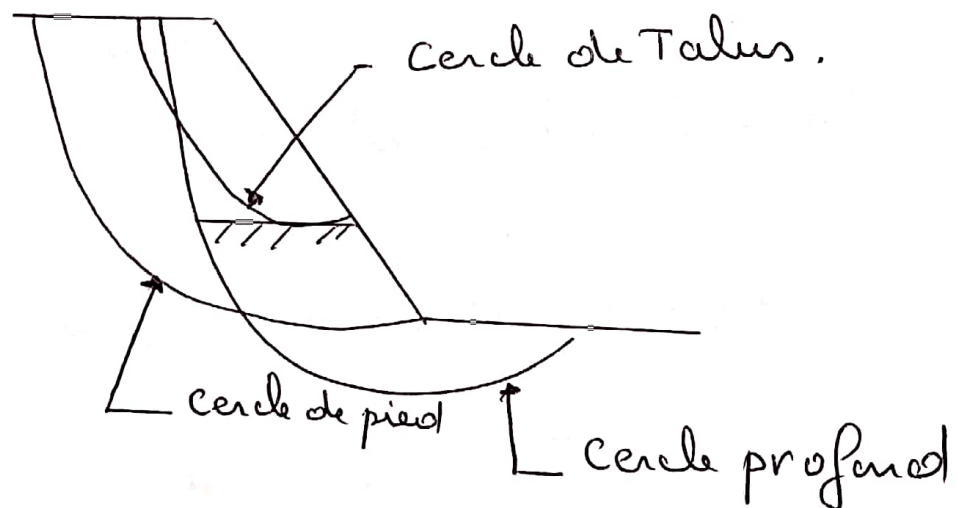


Fig 4 - Different Types de rupture circulaire

Les glissements de Talus se produisent généralement dans les sols hétérogènes, la base du cercle correspondant à une couche plus résistante :

- Les cercles de pied sont les plus courants dans ce Type d'ouvrage
- Les cercles profonds ne se produisent que dans le cas où le sol situé sous le niveau du pied de Talus est de mauvaise qualité.

II-6 - Talus en remblai sur sol compressibles.

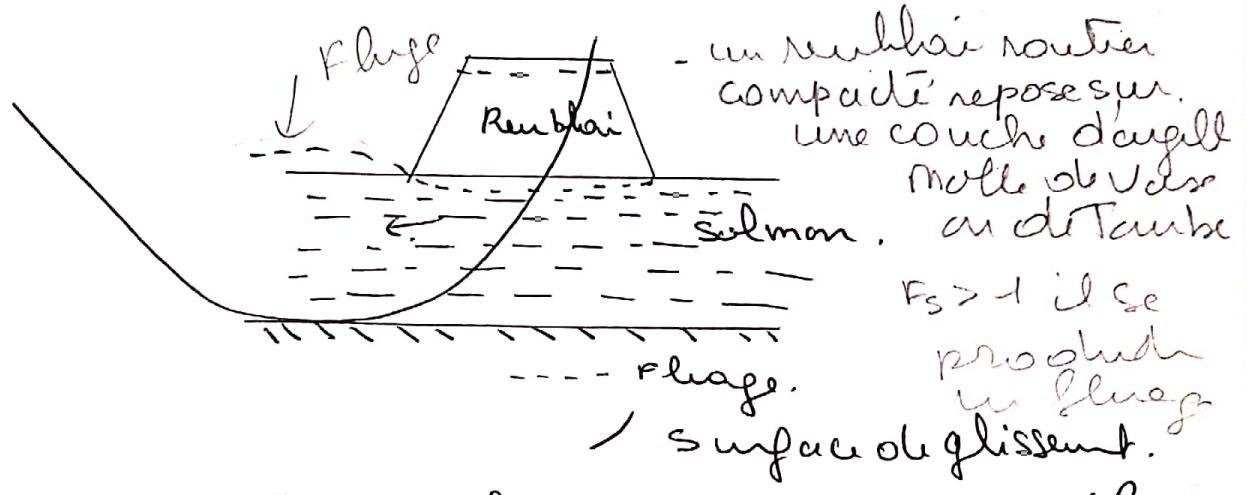


Fig II - Remblai sur sol compressible.

Rupture profonde.
 Sol compressible. constitué d'argile molle, vase ou de Tourbe.

II-7 - Stabilité sans les Soutènement

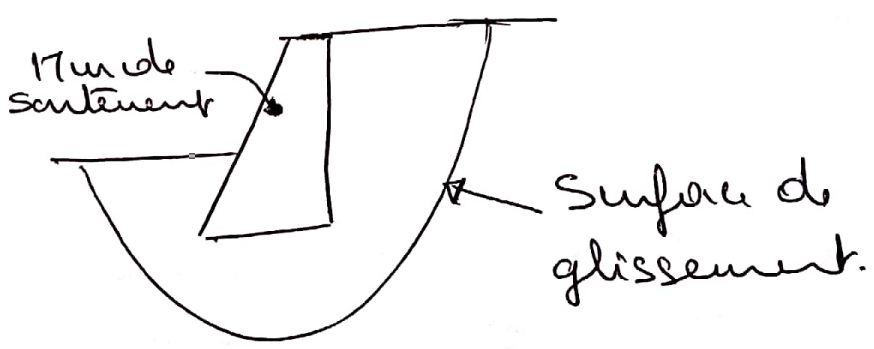


Fig 6 - Rupture circulaire sous un Soutènement

Dans ce genre d'ouvrage, il faut s'assurer contre les risques⁷ de rupture circulaire profonde.

II-8 - Diques et barrage en terre.

L'étude de la stabilité des Talus amonts et aval est la partie essentielle de la conception des barrages en Terre.

Différents cas doivent être étudiés en tenant compte de l'état des pressions interstitielles à l'intérieur de la digue.

III - Calcul de stabilité en rupture circulaire

III-1 - Méthode de Tranches de Fellenius.

III-1-1 - Principe.

Considérons un Talus recoupant un certain nombre de couches de sols de caractéristiques différents c_i, ϕ_i, γ_i .

Soit un cercle quelconque de centre O et de rayon R pour lequel on veut déterminer le coefficient de sécurité vis-à-vis du risque de glissement.

La méthode consiste, tout d'abord, à découper le volume de sol intéressé (compris dans l'arc AB) en un certain nombre de tranches limitées par des plans verticaux :

- Il convient de réaliser le découpage de telle façon que l'intersection du cercle de glissement et d'une limite de couches (points C et D) corresponde à une limite entre deux tranches.

- l'expérience montre qu'il n'est pas nécessaire de découper le massif en un très grand nombre de tranches pour obtenir une précision satisfaisante.

Exemple :

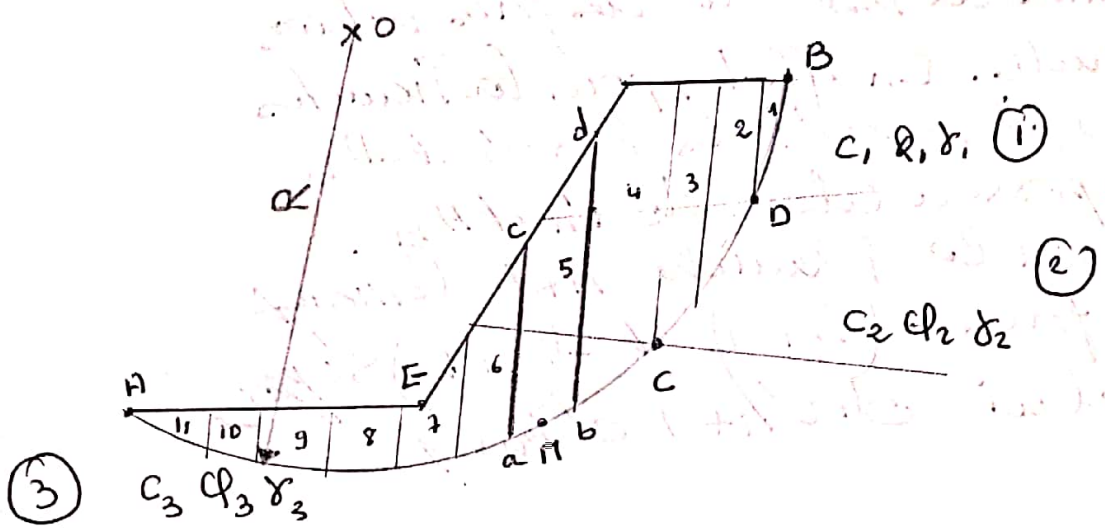
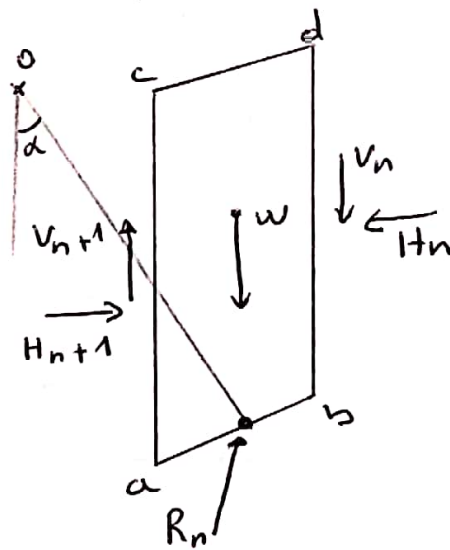


Fig 7. Découpage en tranches d'un Talus

Nous allons étudier l'équilibre de l'une de ces tranches, par exemple la tranche « a b c d » que l'on affectera de l'indice n , n varie de 1 à 11.



a) Forces agissant sur une tranche

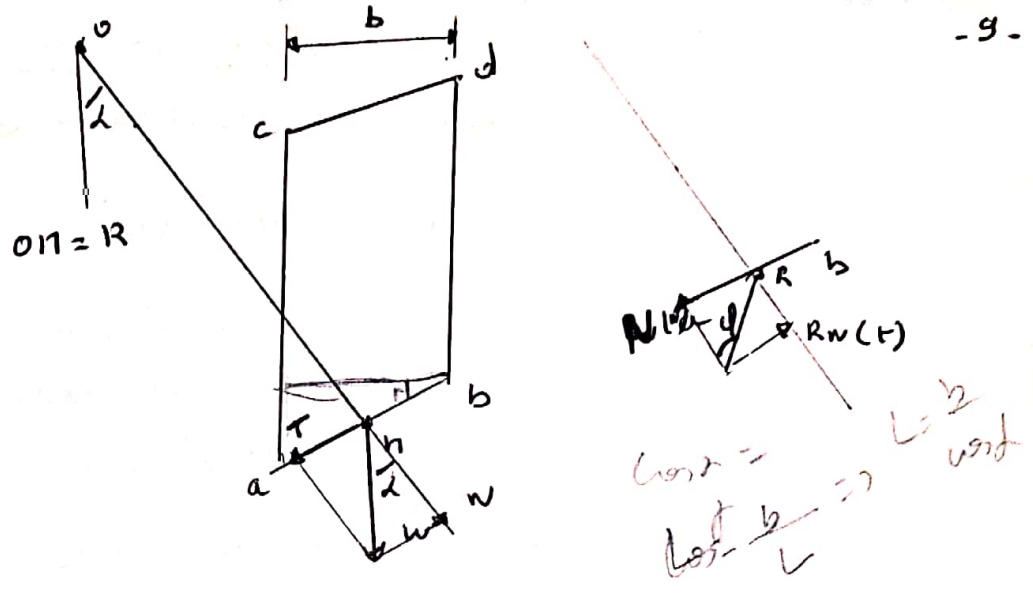


Fig 8. b) Hypothese de Fellenius.

Les forces agissant sur cette tranche (Fig 8-a) sont :

- Son poids w .
- La réaction R_w du milieu sous-jacent sur l'arc \widehat{ab} ,
- Les réactions sur les faces verticales bd et ac que l'on peut décomposer en réactions horizontales H_n et H_{n+1} et en réactions verticales V_n et V_{n+1} . Il s'agit de faces internes au massif étudié.

* Nous définirons par rapport au centre O :

- Le moment moteur comme celui du poids des terres w (et des surcharges) tendant à provoquer le glissement.
- Les moments résistants comme ceux des réactions s'opposant globalement au glissement de la tranche, à savoir moments de R_w, H_n, H_{n+1}, V_n et V_{n+1} .

Le coefficient de sécurité F_s est défini comme le rapport :

$$F_s = \frac{\sum \text{des moments résistants maximaux}}{\sum \text{des moments moteurs}}$$

La somme des moments des faces internes, est nulle.

Fellenius a fait une hypothèse qui simplifie considérablement les calculs, à savoir que la seule force agissant sur l'arc \widehat{ab} était le poids W , et R_w (face interne)

Décomposons le poids W en une force normale à ab , soit N , et une force Tangentielle à ab , soit T .

Dans ces conditions, le moment résistant maximale est fourni par la valeur maximale que peut prendre la composante Tangentielle de R_w .

D'après la loi de Coulomb.

$$(R_w)_t = C_i \widehat{ab} + N \tan \varphi_i.$$

$$\sum_i^n R \times [C_i \widehat{ab} + N \tan \varphi_i].$$

$m =$ nombre Total de tranches.

C_i et $\varphi_i =$ caractéristiques mécaniques de la couche dans laquelle est située l'arc \widehat{ab}

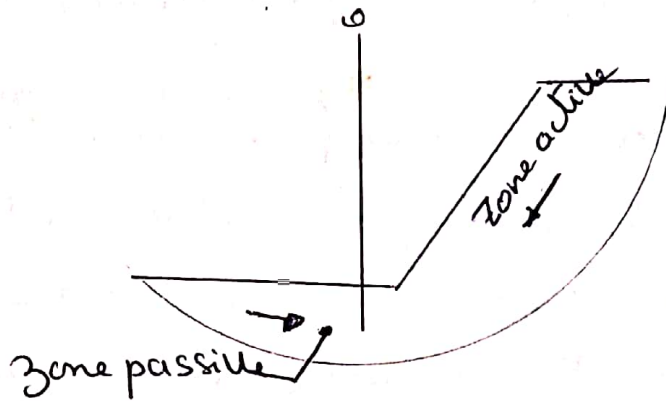
moment moteur dû à T est $T \times R$.

$$F_s = \frac{\sum_i^m [C_i \widehat{ab} + N \tan \varphi_i] \times R}{\sum_i^m T \cdot R.}$$

Remarque:

- Lorsque l'on a affaire à des cercles profonds. Le massif du sol situé côté aval à un effet stabilisateur.

~~Les zones~~



- Cercles profonds

- Avec les notations définies sur la figure 8b - la formule s'écrit:

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^m \left(c_i \frac{b}{\cos \alpha} + w \cos \alpha \gamma c_i \right)}{\sum_{i=1}^m w \sin \alpha}$$

Application pratique:

Méthodologie: Nous avons vu comment calculer le coefficient de sécurité F_s pour un cercle donné a priori.

Pour connaître le coefficient de sécurité réel d'un talus, il faut définir le cercle donnant la valeur minimale de F_s , c'est en effet le long de cette surface de glissement que la rupture se produira.

Il n'y a pas de méthode précise pour définir ce cercle.

La méthode générale consiste à calculer le coefficient

Exemple: Soit le Talus ci dessous présentant les -12-

Caractéristiques suivantes, en considérant un système d'axes Ox, Oy . Le point O représente le pied du Talus; pente 35° hauteur $10m$.

Caractéristiques de la première couche.

$$\gamma_1 = 20 \text{ kN/m}^3.$$

$$\varphi = 35^\circ$$

$$C_u = 10 \text{ kPa}.$$

2^e couche: $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$.

$$\varphi = 11^\circ$$

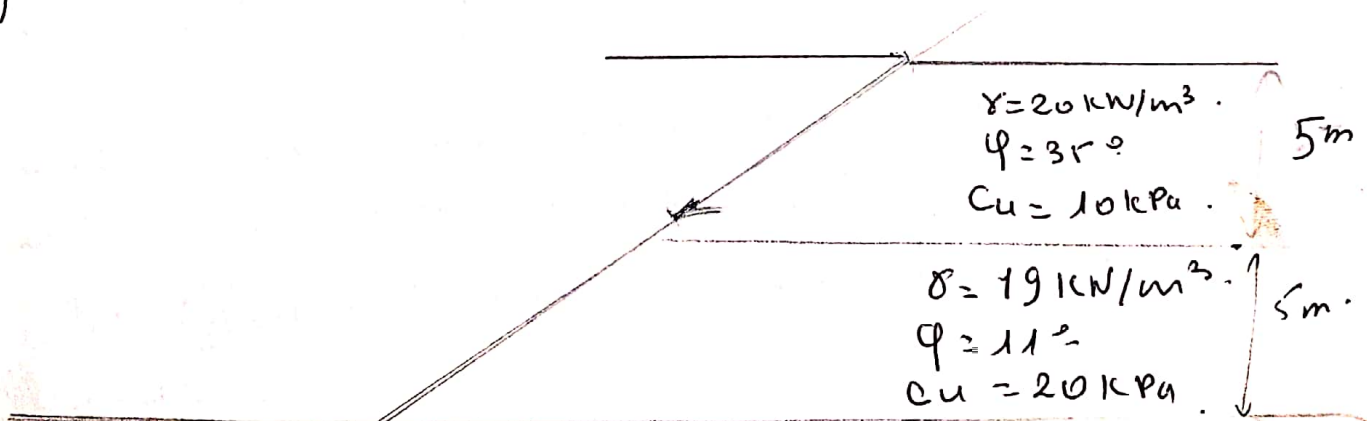
$$C_u = 20 \text{ kPa}.$$

Calculer le coefficient de sécurité ~~à~~ pour un cercle dont les coordonnées du centre sont:

$$x = 0, y = 13m, R = 15m$$

a) par la méthode de Fellenius.

b) par la méthode de Bishop Simplifiée.



III - 2 - 1. Méthode détaillée.

Les composantes V_i, V_{i+1}, H_i et H_{i+1} des réactions sur les tranches verticales interviennent dans les effets appliqués sur ab , donc influencent la réaction R_w .

Bishop a publié une méthode que nous appellerons méthode détaillée, permettant de calculer le coefficient de sécurité F_s en tenant compte de ces sollicitations.

Le coefficient de sécurité est donné par la formule générale :

$$F_s = \frac{1}{\sum_1^m w \sin \alpha} \sum_1^m \left[\frac{w + (V_n - V_{n+1}) - U b}{\cos \alpha + \sin \alpha \cdot \frac{\tan \varphi'}{F_s}} \right]$$

III - 2 - 2. Méthode de Bishop simplifiée

Cette méthode consiste à faire l'hypothèse que $V_n - V_{n+1} = 0$ - quelque soit la tranche considérée.

L'équation ci dessus devient :

$$F_s = \frac{1}{\sum_1^m w \sin \alpha} \sum_1^m \left[\frac{(w - U b) \tan \varphi' + c' b}{\cos \alpha + \sin \alpha \cdot \frac{\tan \varphi'}{F_s}} \right]$$

Dans ce cas tous les termes sont connus et F_s est calculé par itérations successives. On prend pour première valeur F_{s0} , le coefficient de sécurité obtenu par la méthode de Fellenius.

14

La méthode de Bishop simplifiée, ne s'applique qu'en rupture circulaire, elle se prête bien au calcul itératif

IV.1 Autres méthodes

a. Méthode globale :

- Un calcul global peut être effectué dans le cas :
- D'un terrain homogène et isochète définie par ces caractéristiques δ , C , ϕ et la pression U de l'aquifère;
 - D'un talus de hauteur H faisant un angle β avec l'horizontale.

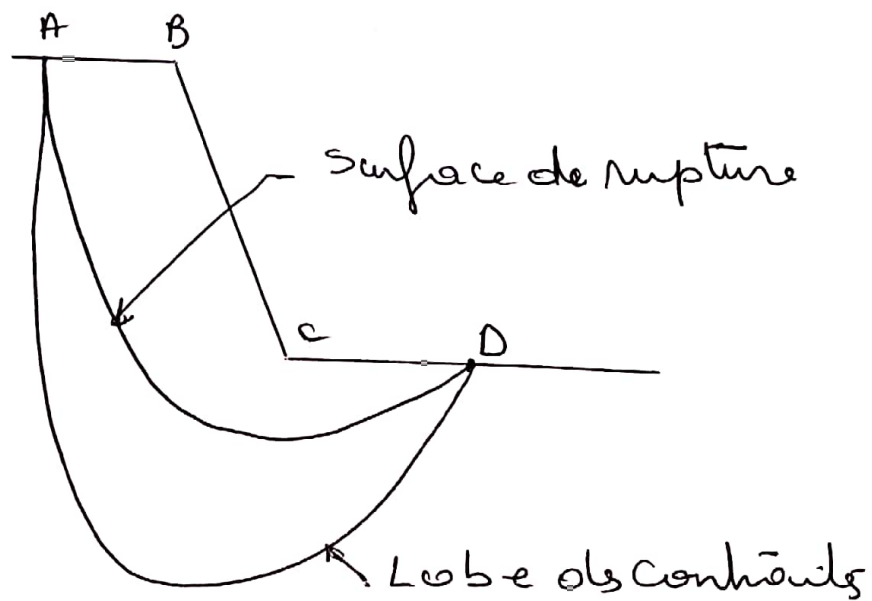
Le coefficient de sécurité de différents cercles peut être calculé analytiquement (si des hypothèses sur la répartition des contraintes le long de la surface de rupture sont effectuées) et le coefficient de sécurité du talus est le plus faible de ces coefficients.

Il existe des abaques permettant de déterminer le coefficient de sécurité et la position de la surface la plus défavorable. dans ces cas simples (Méthode de Taylor ou de Biarez) -

b) Méthode des perturbations :

La méthode des perturbations a été proposée par Raulin et Al en 1974. c'est ~~une~~ méthode globale

15
qui vérifie les trois équations de la statique, elle permet de calculer le coefficient de sécurité F_s mais également le lobe des contraintes normales le long de la surface de rupture potentielle, elle est particulièrement utilisée pour les calculs de stabilité en rupture non circulaire.



Geométrie de la surface de rupture et répartition des contraintes

Les deux hypothèses générales de cette méthode consistent à admettre que le coefficient de sécurité est constant le long de la courbe de rupture et que la contrainte normale est égale à la contrainte initiale σ_0 majorée d'un terme que l'on appelle le terme de majoration.

$$\sigma_h = \sigma_0 (\lambda + \nu v)$$

avec : σ_0 : valeur initiale a l'approche de la contrainte

v : paramètre de perturbation.

λ et ν : deux termes inconnus que le calcul définira.

Le coefficient de sécurité est définie comme précédemment

$$F = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{red}}$$

F_s étant constant tout le long de la surface de rupture potentielle, la résolution du problème permet de déterminer

λ , ν et v .

Choix des valeurs σ_0 et v .

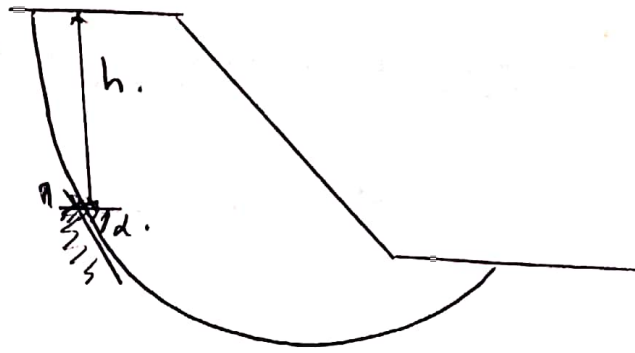
plusieurs choix peuvent être faits pour σ_0 et v , les principaux sont actuellement.

* σ_0 au point Π de la courbe de rupture, δh est la contrainte verticale sur la facette horizontale et σ_0 la contrainte normale sur la facette inclinée de α . Raulin (1974) avait proposé

$$\sigma_0 = \delta h \cos^2 \alpha, \text{ Faure 1985, il est correct de prendre seulement}$$

δh comme contrainte verticale.

$v = rg \alpha$ proposé par Raulin.



Conclusion :

Les deux méthodes les plus couramment utilisées en bureau d'études sont :

- * La méthode de Bishop simplifiée, la méthode de Fellenius permettant de calculer, généralement, le coefficient de sécurité initial,
- * La méthode des perturbations, en particulier pour les ruptures non circulaires, Elle a l'avantage de fournir le lobe des contraintes normales le long de la surface de rupture.

Généralement, c'est au projeteur de rechercher la surface potentielle de rupture qui donne le coefficient de sécurité F_{min} .

Le calcul de stabilité des pentes nécessite au préalable d'avoir déterminé la répartition des pressions interstitielles dans tout le volume du sol exploré.

Généralement, pour qu'il ait stabilité, on recherche un coefficient de sécurité global de 1,5 en phase définitive et de 1,3 en phase provisoire.

Les calculs aux états limites ultimes (ELU) sont en cours de développement dans l'EC7.

Les calculs de stabilité sont effectués en France à partir des principaux logiciels suivant :

- GEOSTAB
- PETAL
- TALREN

IV. Stabilité en Rupture Plane.

13

IV. 1. Pente indéfinie. Rupture selon un plan parallèle à la pente.

Soit une pente indéfinie d'inclinaison β dans un sol ayant pour caractéristiques :

- Poids spécifique :
 γ , au dessus de la nappe.
 γ_{sat} , au dessous de la nappe.
- Cohésion c'
- angle de frottement interne ϕ' .

Supposons de plus que la nappe régit sur une hauteur hw au dessus de la ligne AB et s'écoule donc parallèlement à la pente, ce qui est un cas courant. Les lignes de courant sont donc // à la pente et les équipotentielles sont des droites inclinées de β sur la verticale.

Considérons l'équilibre du prisme ABCD de largeur b :

- par symétrie les réactions sur AB et BC sont égales et opposées.

$$- \text{Le poids } W = [\gamma, (z-hw) + \gamma_{sat} hw] \cdot b.$$

Ce qui peut s'écrire sous la forme :

$$W = b \sum_0^z \gamma h, \quad h \text{ étant l'épaisseur d'une couche quelconque et } \gamma \text{ son poids spécifique apparent.}$$

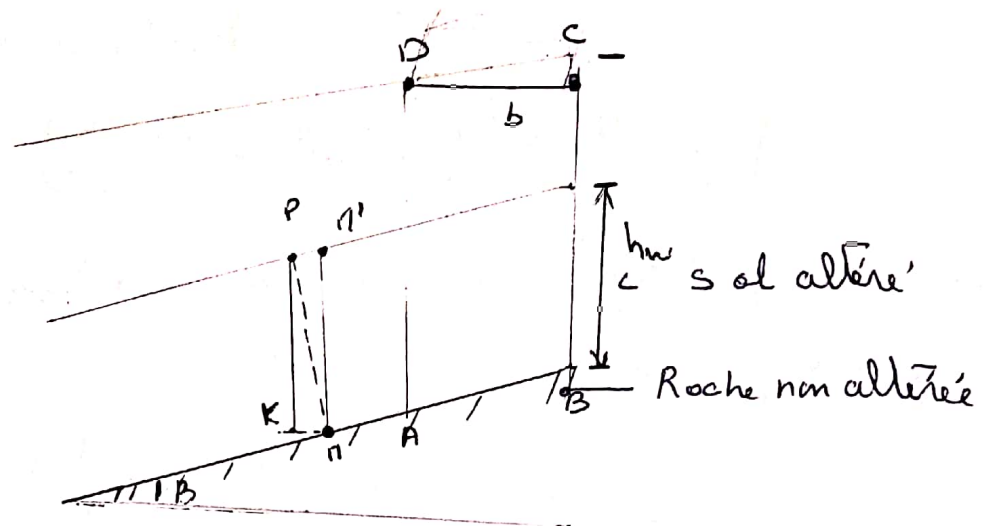
Décomposons W en des composantes normales N et Tangentielle T

$$N = [\gamma, (z-hw) + \gamma_{sat} hw] \cdot b \cdot \cos \beta.$$

$$= b \cos \beta \cdot \sum_0^z \gamma h.$$

$$T = [\gamma, (z-hw) + \gamma_{sat} hw] \cdot b \cdot \sin \beta.$$

$$= b \sin \beta \cdot \sum_0^z \gamma h.$$



$$h_n = h_p \text{ (par définition)}$$

$$h_n = \frac{u_n}{\gamma_w} + z_n$$

$$h_p = \frac{u_p}{\gamma_w} + z_p$$

$$\Rightarrow \frac{u_n}{\gamma_w} + z_n = \frac{u_p}{\gamma_w} + z_p \text{ avec } u_p = 0$$

$$\Rightarrow \frac{u_n}{\gamma_w} + z_n = z_p$$

$$\text{d'où } \frac{u_n}{\gamma_w} = z_p - z_n \Rightarrow u_n = (z_p - z_n) \gamma_w$$

$$\Rightarrow u_n = PK \cdot \gamma_w = Pn \cos \beta \cdot \gamma_w = nn' \cos^2 \beta \cdot \gamma_w$$

$$\boxed{u_n = h_w \cdot \cos^2 \beta \cdot \gamma_w}$$

$$U = h_w \cdot \cos^2 \beta \cdot \gamma_w \cdot \frac{b}{\cos \beta} = h_w \cos \beta \cdot \gamma_w \cdot b$$

Finalement, la résistance maximale mobilisable en cisaillement le long de AB est d'après l'équation de Coulomb.

$$R = c' \cdot AB + (W - U) \operatorname{Tg} \varphi'$$

$$R = c' \cdot \frac{b}{\cos \beta} + \left(\sum_0^z \gamma \cdot h - \sum_0^z \gamma_w h_w \right) \tan \beta \cdot \operatorname{Tg} \varphi'$$

Le coefficient de sécurité vis à vis de la rupture le long du plan situé à la profondeur z est donné par la formule

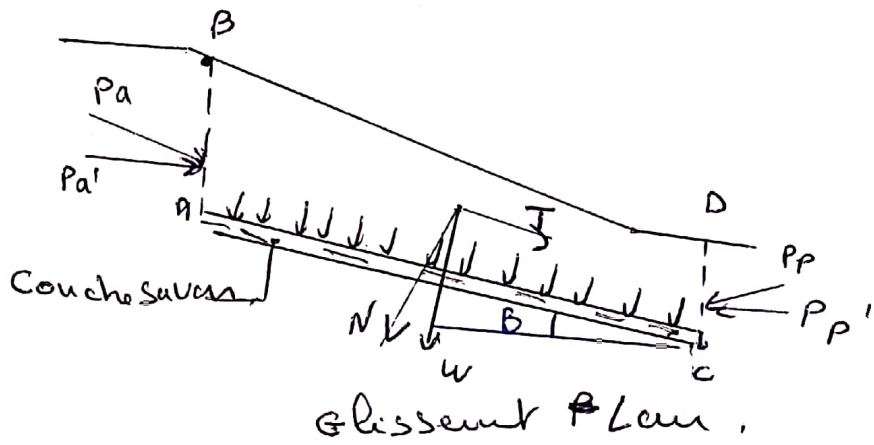
$$F_s = \frac{R}{T} = \frac{c' + \left(\sum_0^z \gamma h - \sum_0^z \gamma_w h_w \right) \cos^2 \beta \operatorname{Tg} \varphi'}{\sin \beta \cos \beta \sum_0^z \gamma h}$$

La formule ci-dessus montre que F_s diminue lorsque h_w augmente. Ceci explique que les glissements de terrain se produisent essentiellement en période pluvieuse. Cette remarque est générale et valable, quel que soit la forme de la surface de glissement. Un des procédés utilisés pour stabiliser les pentes consiste à les drainer afin de diminuer U .

IV-2 - Pente de maintien fine

C'est par exemple le cas du Talus qui menace de glisser sur une couche saven de pente β . La méthode consiste à étudier l'équilibre du volume de sol compris entre le plan avant AB et le plan aval CD. Les forces de cisaillement qui tendent à provoquer le mouvement sont constituées par :

- La composante selon la direction AC de la poussée des terres P_a situées à l'amont: $P_{a'}$.
- la composante selon AC du poids W , soit: $T = W \sin \beta$.



- Les forces résistantes sont:
 - La composante P_{DC} de la réaction des terres à l'aval (butée soit $P_{p'}$).
 - La résistance au cisaillement le long de AC qui, dans le cas général, est.

$$R = c' AC + (W \cos \beta - U) T \varphi'$$

$$U = \int_A^C u \cdot dl$$

et c' et φ' caractéristiques mécaniques effectives de la couche saven.

Le coefficient de sécurité sera.

$$F_s = \frac{R + P_{p'}}{P_{a'} + T}$$

La position des plans AB et CD donnant la valeur minimale de F_s