

## Chap.2. Stabilité des Pentes et des Talus ( Glissement de terrain.)

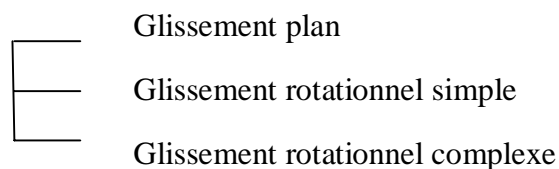
### 5.1. Introduction.

- Les problèmes de stabilité de pente se rencontrent dans la construction des routes, des canaux, des digues et des barrages. Lorsque les talus ou les pentes ont une grande hauteur, l'instabilité constitue un risque élevé. La stabilité des pentes intéresse aussi bien les pentes naturelles que les talus créés par l'homme.

### 5.2. Classification des mouvements de terrain.

#### 5.2.1. Pentes naturelles.

- On distinguera :
  - Les écroulements
  - Les glissements  $\Rightarrow$
  - Le fluage et solifluxion
  - Coulées boueuses.



#### 5.2.2. Description des principaux types de mouvements.

##### a) Les écroulements et chutes de pierres :

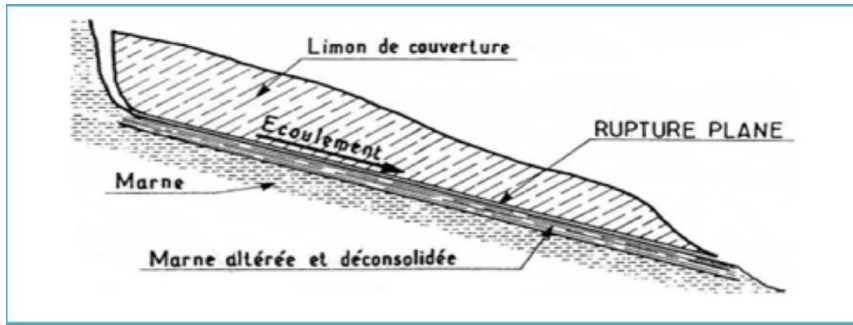
- Les écroulements concernent les masses rocheuses, ils sont spectaculaires et dangereux, mais ils sont heureusement assez rares.

##### b) Les glissements :

- Les glissements affectent les sols et sont fréquents à l'échelle de chantier. La vitesse de rupture peut être très variable.

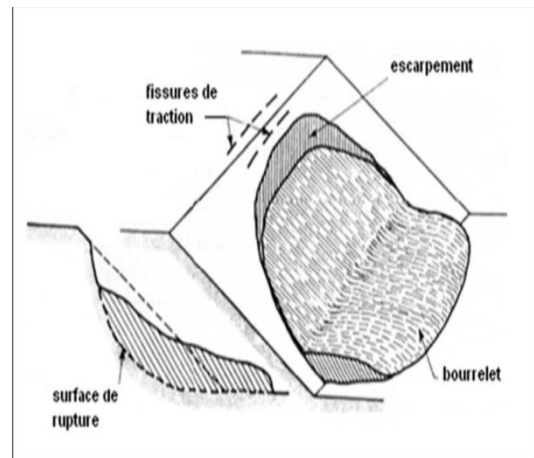
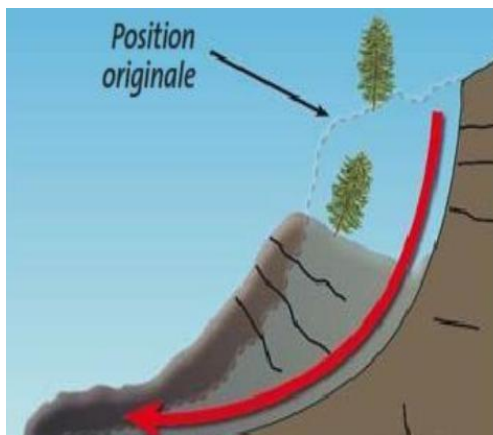
##### b.1.) Glissement plan.

- En générale, la ligne de rupture suit une couche de mauvaise caractéristiques sur la quelle s'exerce d'ailleurs souvent l'action de l'eau.



**b.2.) Glissement rotationnel simple.**

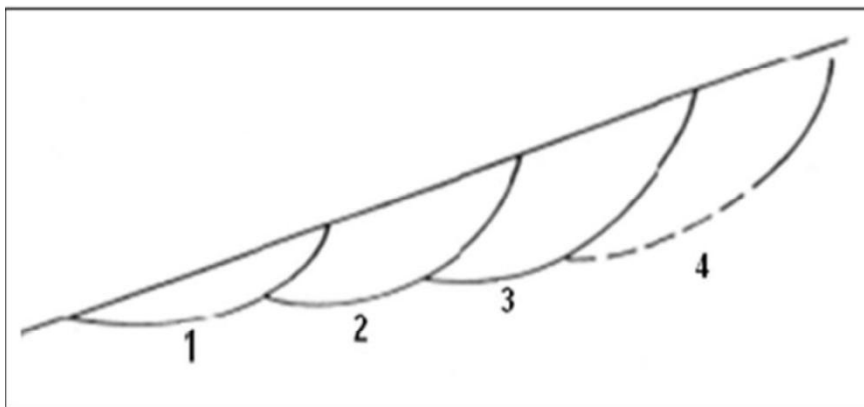
- Ce type de glissement est fréquent sa surface de rupture a une forme simple et peut être assimilée à un cylindre.



Glissement rotationnel (dont la ligne de glissement peut être assimilée à un cercle).

**b.3.) Glissement rotationnel complexe.**

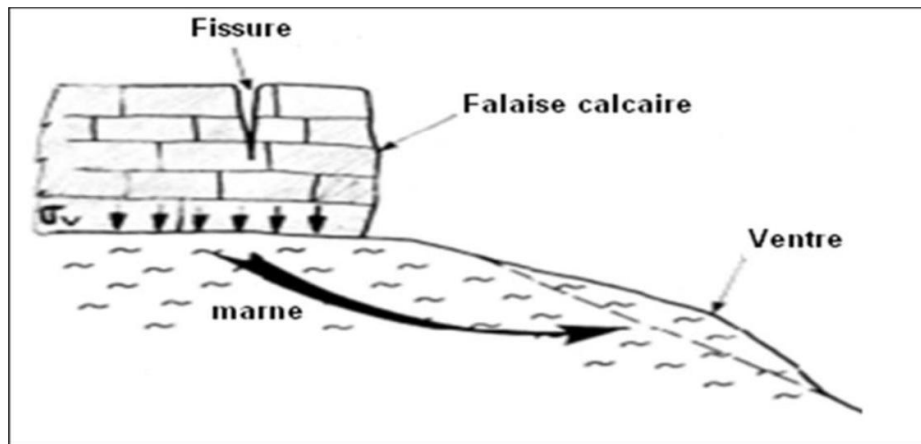
- Il s'agit de glissement multiple (emboîtés), les uns dans les autres dus à la suppression de la butée provoqué par le glissement précédent, ce qui entraîne ainsi les glissements successifs.



Glissements successifs emboîtés.

c) **Fluage et solifluxion :**

- Le fluage correspond à des mouvements lents à une vitesse faible, resultat d'un état d'équilibre instable. La surface de rupture est mal définie.



Exemple de fluage.

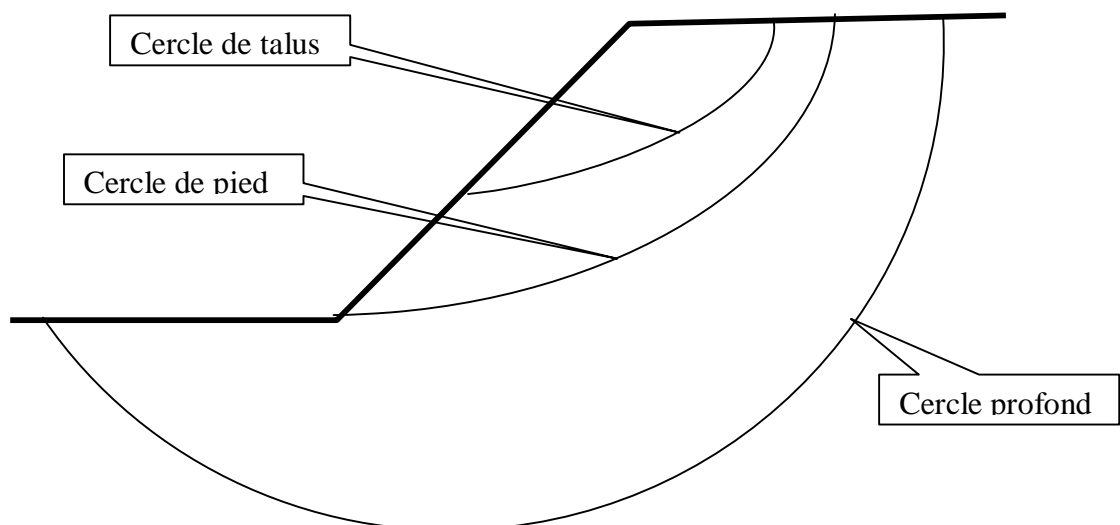
- **Solifluxion :** la solifluxion est un cas particulier de fluage, il s'agit d'un phénomène superficiel du aux variations volumique du sol au cours des saisons (gel et dégel).

d) **Coulées boueuses:**

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

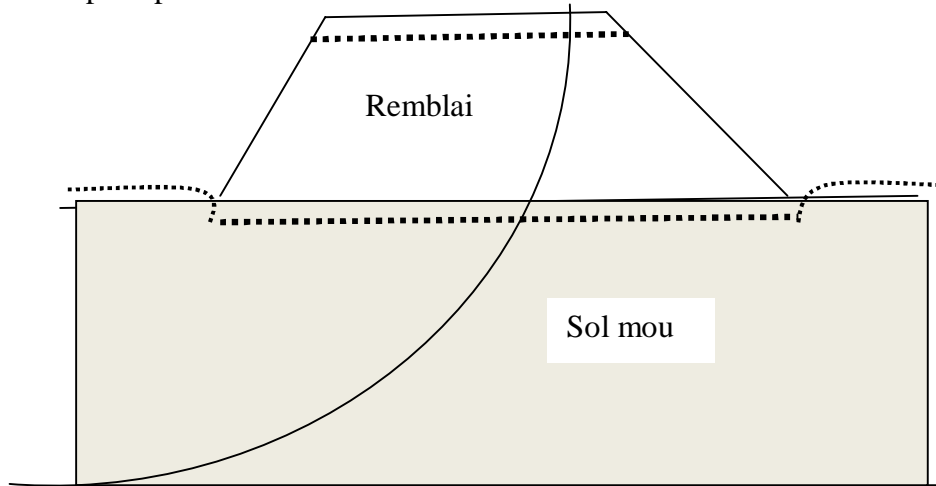
e) **Talus en déblai et talus en remblai sur sol non compressible.**

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

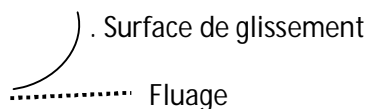


a) **Talus en remblai sur sol compressible.**

- Le remblai en sol compacté (remblai routier par exemple) repose sur une couche d'argile molle, de vase ou de tourbe. Les ruptures seront profondes, les cercles de ruptures sont de plus tangents à la base de la couche molle lorsque celle-ci est relativement peu épaisse.

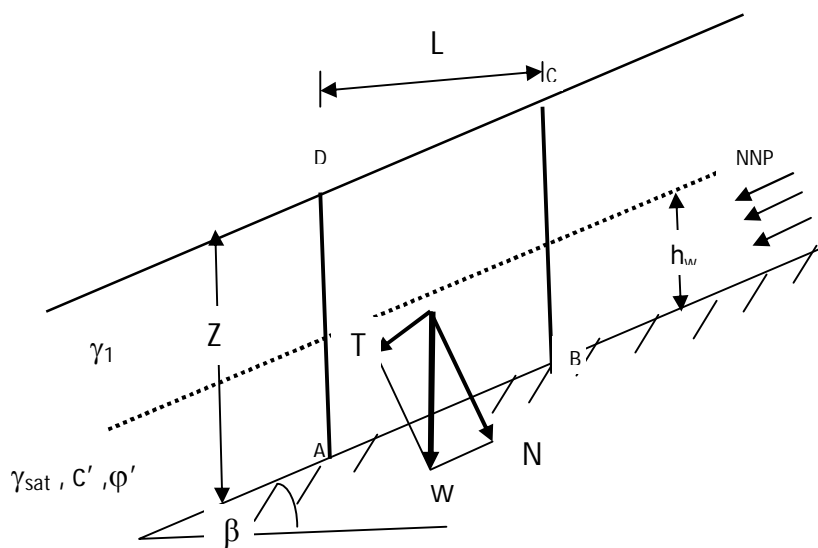


Remblai sur sol mou.



5.3. **Glissement plan.**

- Soit une pente infinie d'inclinaison  $\beta$  dans un sol ayant pour caractéristique :



- Poids volumique :  $\gamma_1$  , au dessus de la nappe  
 $\gamma_{sat}$  , au dessous de la nappe
- Cohesion  $c'$
- Angle de frottement interne  $\varphi'$
- Par symétrie les reactions sur AD et BC sont égales et opposées.
- Le poids  $W = [\gamma_1(z - h_w) + \gamma_{sat}h_w].L$

Ce qui peut sous la forme :

$$W = L \cdot \sum_0^z \gamma \cdot h$$

$h$  : étant l'épaisseur d'une couche quelconque et  $\gamma$  sont poids volumique apparent.

- Décomposons  $W$  en des composantes normale  $N$  et tangentielle  $T$  :

$$N = L \cdot \cos \beta \sum_0^z \gamma \cdot h$$

$$T = L \cdot \sin \beta \sum_0^z \gamma \cdot h$$

- La pression interstitielle sur la facette AB est :

$$u = \frac{\gamma_w h_w \cdot L \cdot \cos \beta}{\frac{L \cdot 1}{\cos \beta}}$$

$$\cos \beta = \frac{S}{S_1} \Rightarrow S_1 = \frac{S}{\cos \beta} , (S = L \cdot 1)$$

- $u$  : est perpendiculaire à la surface  $S_1 \Rightarrow u = \gamma_w \cdot h_w \cdot \cos^2 \beta$
- La résultante  $U = u \cdot AB$ . Orienté sur la normale à  $AB \Rightarrow U = \gamma_w \cdot h_w \cdot L \cdot \cos \beta$ .
- On sait que :  $\sigma' = \sigma - u$

- Finalement la résistance maximale ( contrainte de cisaillement ) mobilisable en cisaillement le long de AB et d'après l'équation de COULOMB.

$$\tau = c' + \sigma' \operatorname{tg} \varphi' \quad , \quad R = \tau \cdot S_1$$

$$R = c' \cdot AB + (N - u) \operatorname{tg} \varphi'$$

$$\text{Soit : } R = c' \frac{L}{\cos \beta} + (\sum_0^z \gamma \cdot h - \gamma_w \cdot h_w) L \cdot \cos \beta \operatorname{tg} \varphi'$$

- Et le coefficient de sécurité vis-à-vis de la rupture le long du plan situé à la profondeur «  $Z$  » est donné par la formule suivante.

$$F_S = \frac{R}{T} = \frac{c' + (\sum_0^Z \gamma \cdot h - \gamma_w \cdot h_w) \cos^2 \beta \cdot \text{tg} \varphi'}{\sin \beta \cos \beta \sum_0^Z \gamma \cdot h}$$

- Nous avons étudié le cas général avec poussée d'écoulement. s'il n'y a pas de nappe le poids volumique peut être considéré comme constant.
- Donc on aura :

$$F_S = \frac{c + \gamma \cdot Z \cdot \cos^2 \beta \cdot \text{tg} \varphi}{\gamma \cdot Z \cdot \sin \beta \cos \beta}$$

- Si le sol est une argile saturé dans un comportement à court terme :

$$c = c_u \quad \text{et} \quad \varphi = \varphi_u = 0$$

$$F_S = \frac{c_u}{\sin \beta \cos \beta \sum_0^Z \gamma \cdot h}$$

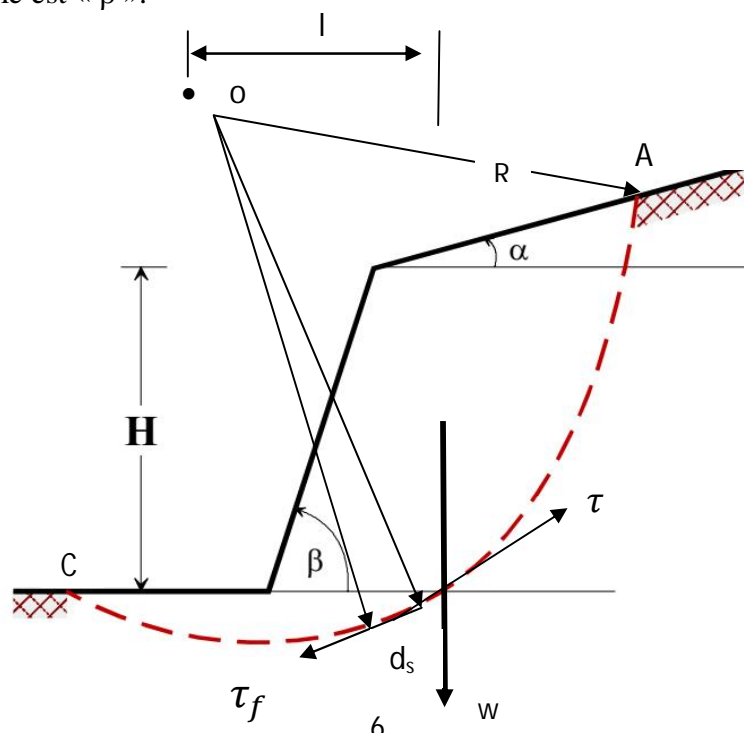
- Si le sol est pulvérulent :

$$F_S = \frac{\text{tg} \varphi'}{\text{tg} \beta}$$

## 5.4. Glissement rotationnel (circulaire).

### 5.4.1. Introduction.

- Nous examinerons le risque de rupture circulaire d'un talus dont l'angle avec l'horizontale est «  $\beta$  ».



- La masse de la surface glissante est « w ».
- à l'équilibre  $W.l = R. \int_C^A \tau d_s$
- selon l'état d'équilibre limite de COULOMB, pour que le sol soit en état d'équilibre il faut que :

$$\tau \leq \tau_f \quad (\tau_f = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi)$$

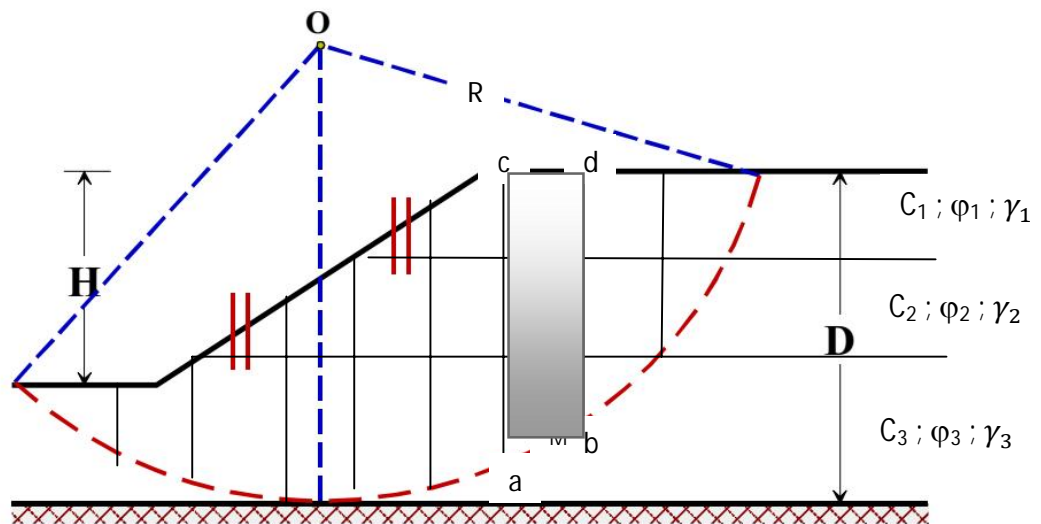
- donc le coefficient de sécurité par définition est :

$$F_s = \frac{R \int_C^A \tau_f d_s}{R \int_C^A \tau d_s}$$

$$F_s = \frac{\sum_C^A \text{des moments résistants}}{\sum_C^A \text{des moments moteurs}}$$

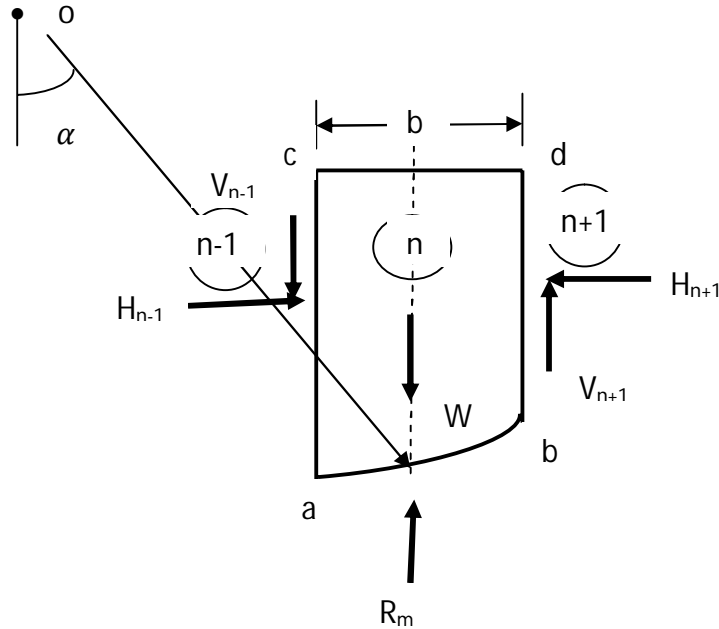
- Le moment moteurs comme celui du poids des terres « w » et des surcharges éventuelles tendant à provoquer le glissement.
- Le moment résistant comme ceux des réactions s'opposant globalement au glissement.

#### 5.4.2. Méthode des tranches de FELLENIUS.



Découpage en tranches d'un talus

- Il convient de réaliser le découpage de telle façon que l'intersection du cercle de glissement et d'une limite de couche corresponde à une limite entre deux tranches.
- L'étude de l'équilibre de l'une de ces tranches (on suppose que la surface de la tranche est hors d'eau). « hors d'eau : qui n'est plus exposé aux dégâts causés par l'eau ».

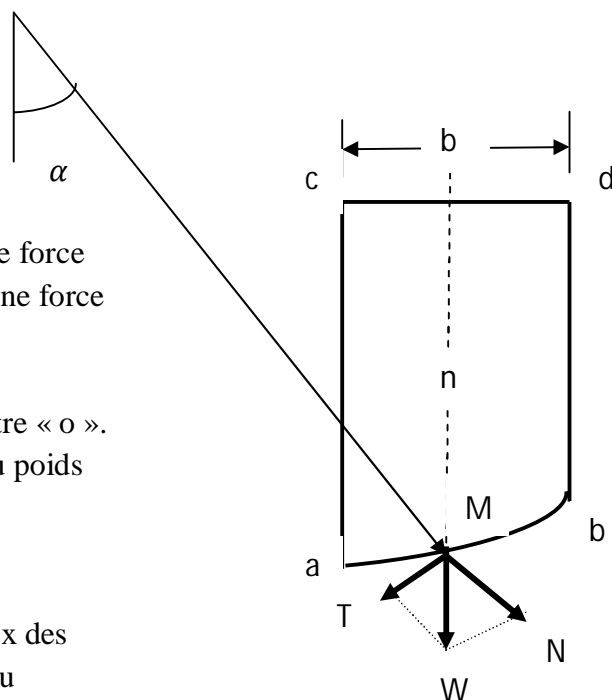


**Fig.5.4.2. Equilibre d'une tranche de sol (Fellenius)**

- F... tique ne nous donne que 3 équations.
- Pour résoudre le problème Fellenius à fait une hypothèse qui simplifie considérablement le problème à savoir que les seules forces qui agissent sur l'arc « ab » étant « W » et « R », à l'exception des forces internes qui s'annulent entre elles.

• **Hypothèse de Fellenius**

- Décomposant le poids « W » en une force normale à l'arc « ab » en « N » et une force tangentielle à l'arc « ab » en « T ».
- Pour une tranche :
- Nous définirons par rapport au centre « o ».
- Le moment moteur comme celui du poids des terres « w » et (des surcharges éventuelles) tendant à provoquer le glissement.
- Les moments résistants comme ceux des réactions s'opposant globalement au glissement de la tranche, à savoir moment de  $R_n$  ;  $H_{n-1}$  ;  $H_{n+1}$  ;  $V_{n-1}$  ;  $V_{n+1}$ .





- Le coefficient de sécurité FS est défini comme le rapport :

$$F_S = \frac{\sum_A^B \text{des moments résistants maximaux}}{\sum_A^B \text{des moments moteurs}}$$

- Dans ces conditions, le moment résistant maximal est fourni par la valeur maximale que peut prendre la composante tangentielle de  $R_n$ .
- D'après la loi de COULOMB, celle-ci s'écrit :

$$(R_n)_t = c_i \cdot \widehat{ab} + N \cdot \text{tg}\varphi_i \text{ et la somme des moments pour toutes les tranches est :}$$

$$\sum_1^n R \cdot [c_i \cdot \widehat{ab} + N \text{tg}\varphi_i] \text{ tel que :}$$

n: nombre total des tranches

$c_i ; \varphi_i$  : Caractéristiques mécaniques de la tranche dans laquelle est situé l'arc « ab ».

- D'autre part le moment moteur est dû à « T » et égal à « T.R », pour « n » couches  $\sum_i^n R \cdot T$ .

Donc :

$$F_S = \frac{\sum_i^n [c_i \cdot \widehat{ab} + N \text{tg}\varphi_i]}{\sum T} \dots\dots\dots(1)$$

**Remarque .**

- 1) Si le sol est homogène,  $C = C^{te}$  ;  $\varphi = C^{te}$  , la formule (1) devient , en appelant « L » la longueur développée de la surface de rupture :

$$F_S = \frac{C \cdot L + \text{tg}\varphi \sum_i^n N}{\sum_i^n T}$$

- 2) avec les notations définies sur la fig. 5.4.2, la formule peut s'écrire sous la forme :

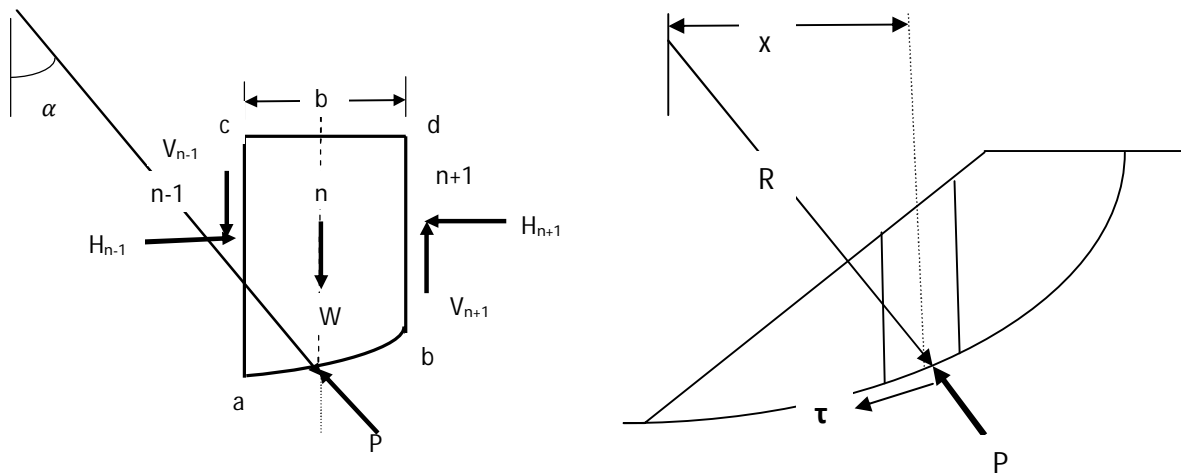
$$F_S = \frac{\sum_i^n \left[ c_i \cdot \frac{b}{\cos \alpha} + W \cdot \cos \alpha \text{tg}\varphi_i \right]}{\sum_i^n w \cdot \sin \alpha}$$

- Les paramètres géométriques intervenant dans le calcul de FS sont alors :
  - La largeur de la tranche « b »,
  - L'angle «  $\alpha$  » que fait le rayon du cercle passant par le milieu de la base de la tranche avec la verticale.
  - La hauteur de la tranche pour le calcul de « W ».
- 3) Trois possibilités de résolution s'offrent à l'ingénieur.
  - Méthodes manuelles.
  - Calcul sur ordinateur
  - Abaque.

- Pour le calcul on adoptera des tableaux du type ci-après :

Cercle N°	Coordonnée du centre $X= x_i ; Y= y_i$					Rayon $R=R_i$
N° de la tranche	Poids $W$	$N$ $(W \cdot \cos \alpha)$	$T$ $(W \cdot \sin \alpha)$	C.L. ou $\frac{c \cdot b}{\cos \alpha}$	$N \cdot \operatorname{tg} \varphi$	Observation
1	.	.	.	.	.	Rappel $F_S = \frac{\sum C.L. + \sum N \cdot \operatorname{tg} \varphi}{\sum T}$
2	.	.	.	.	.	
3	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	
n	.	.	.	.	.	
Total	.	.	$\sum T$	$\sum C.L$	$\sum N \cdot \operatorname{tg} \varphi$	$F_S$

#### 5.4.3. Méthode de BISHOP simplifiée (1954).



- Les composantes  $V_{n-1}$  ;  $V_{n+1}$  et  $H_{n-1}$  ;  $H_{n+1}$  des réactions sur les tranches verticales interviennent dans les efforts appliqués sur l'arc « ab » donc influencent la réaction  $R_n$ .

$W$  : poids de la tranche.

$V_{n-1}$  ;  $V_{n+1}$  : réactions verticales totales sur les faces latérales

$H_{n-1}$  ;  $H_{n+1}$  : réactions horizontales totales sur les faces latérales

$P$  : réaction normale totale sur la surface de glissement

$P'$  : réaction normale effective sur la surface de glissement

$\tau$  : Résistance au cisaillement réellement mobilisable le long de la surface de glissement.

$u$  : Pression interstitielle au niveau de la surface de glissement.

$F_s$  : Coefficient de sécurité.

$X$  : distance de l'axe vertical de la tranche au centre du cercle.

$b$  : largeur de la tranche.

$l$  : longueur de courbe de glissement recoupée par la tranche.

$c'$  : Cohésion effective du sol le long de l'arc « ab ».

$\varphi'$  : angle de frottement interne effectif du sol le long de l'arc « ab ».

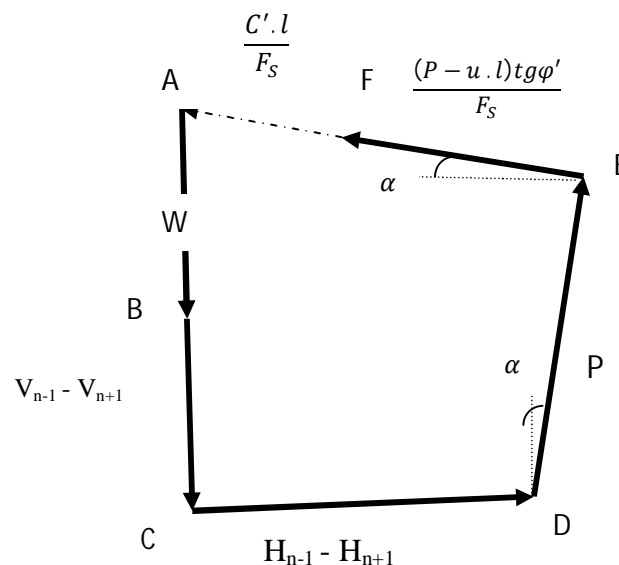
- Prenons le coefficient de sécurité réel du cercle sur les caractéristiques mécaniques.

$$\frac{c'}{F_s} \quad \text{et} \quad \frac{tg\varphi'}{F_s}$$

- La résistance maximale au cisailent le long de « AB ».

$$\tau = \frac{C' \cdot l}{F_s} + \frac{(P - u \cdot l)tg\varphi'}{F_s}$$

- Puisque la tranche est en équilibre donc le polygone des forces doit être fermé.



- On projetant les forces sur la verticale on peut écrire :

$$(P' + u.l) \cos \alpha + \left( \frac{c'.l}{F_S} + \frac{P'.tg\varphi'}{F_S} \right) \sin \alpha = W + V_{n-1} - V_{n+1} \dots\dots (I)$$

- D'autre part, le coefficient de sécurité s'exprime également comme le rapport des moments résultants et des moments moteurs.

$$F_S = \frac{R \cdot \sum_1^n [c.l + (P - u.l)tg\varphi']}{\sum W \cdot x}$$

$$X = R \cdot \sin \alpha \Rightarrow F_S = \frac{\sum_1^n [c'.l + (P - u.l)tg\varphi']}{\sum_1^n w \cdot \sin \alpha} \dots\dots\dots (II)$$

- On posant  $l = b \cdot \cos \alpha$  et en combinant (I) et (II) on obtient :

$$F_S = \frac{1}{\sum_1^n W \cdot \sin \alpha} \cdot \sum \frac{[W + (V_{n-1} - V_{n+1}) - u.b]tg\varphi' + c'.b}{\cos \alpha + \sin \alpha \frac{tg\varphi'}{F_S}}$$

- Méthode de BISHOP simplifiée  $(V_{n-1} - V_{n+1}) = 0$

$$F_S = \frac{1}{\sum_1^n T} \cdot \sum \frac{[W - u.b]tg\varphi' + c'.b}{\cos \alpha + \sin \alpha \frac{tg\varphi'}{F_S}}$$

- Pour déterminer  $F_S$ , il faut procéder par interpolation successives, car  $F_S$  figure aux deux membres de l'équation, on prend pour première valeur de  $F_{S0}$ , le coefficient de sécurité obtenu par la méthode de Fellenuis.

### 5.5. Choix des coefficients de sécurité.

- Il vaut mieux attacher au coefficient de sécurité une valeur probalistique. L'expérience a montré, qu'a condition bien sur qu'il n'y ait pas d'erreur grossière sur les hypothèses de calcul.
  - Les talus étaient toujours stable si  **$F_S > 1,4$** .
  - Le glissement était pratiquement inévitable si  **$F_S < 1,0$** .

### 5.6. Conclusion.

- La méthode de Fellenuis donne des résultats pessimistes par rapport à la méthode détaillée de BISHOP. Les écarts sur  $F_S$  peuvent atteindre 10 %.
- Toute fois, ceux-ci sont modérés et vont dans le sens de sécurité.
- La méthode de Fellenuis qui a l'avantage de la simplicité peut donc être utilisé dans tous les cas courants.
- Pour l'étude de la stabilité des barrages en terre il est souhaitable d'utiliser la méthode de BISHOP simplifiée.