

CHAPITRE 2 : STABILITÉ DES PENTES ET DES TALUS

2.1. Introduction

Un mouvement de terrain (Figure 2.1) est un déplacement, plus ou moins brutal, du sol ou du sous-sol sous l'effet d'influences naturelles (agent d'érosion, pesanteur, séisme, etc.) ou anthropiques (exploitation de matériaux, déboisement, terrassement, etc.). Ce phénomène comprend diverses manifestations, lentes ou rapides, en fonction des mécanismes initiateurs, des matériaux considérés et de leur structure. Les glissements de terrain sont des accidents graves, parfois de grande ampleur, se produisent soudainement ou peuvent durer plusieurs mois. Ils affectent aussi bien des ouvrages construits par l'homme que des pentes naturelles.

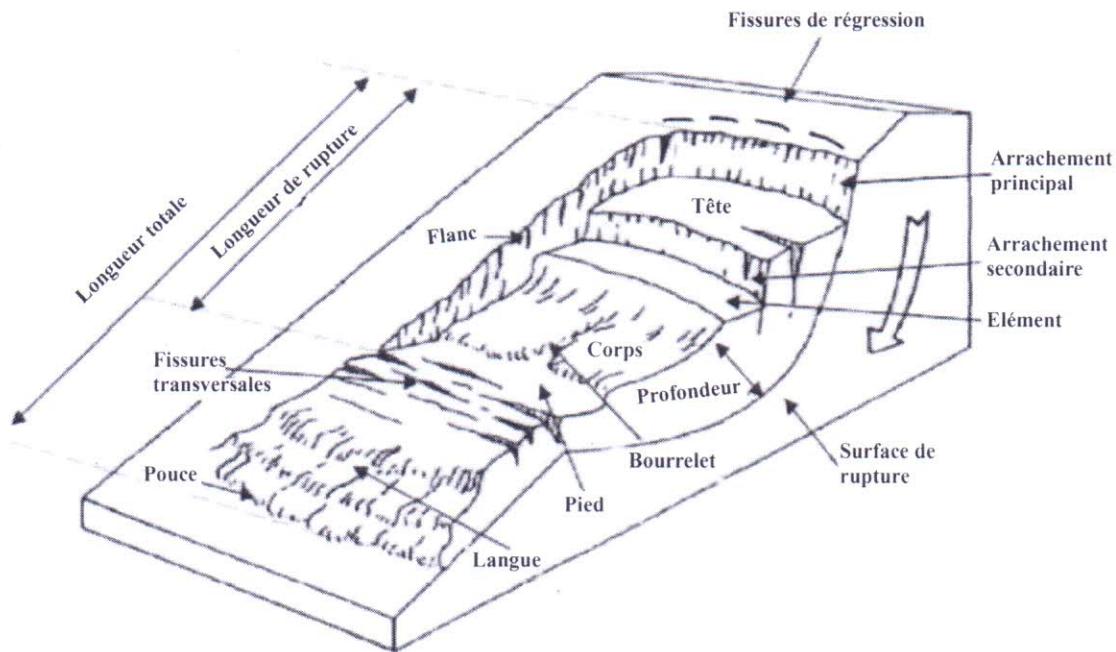


Figure 2.1. Morphologie d'un glissement de terrain (d'après J.P. Bombard, 1968)

On peut distinguer différentes causes de rupture :

- Les ruptures dues aux modifications du moment moteur (surcharges).
- Les ruptures provoquées par les modifications des conditions hydrauliques (apparition d'un écoulement).
- Les ruptures entraînées par les modifications des caractéristiques géotechniques du terrain (rupture à long terme des pentes naturelles).

Plusieurs exemples montrent que la morphologie de glissement présente divers aspects, tant dans les milieux pulvérulents que dans les milieux cohérents.

2.2. Description générale du phénomène

Le moteur des mouvements de terrain est la pesanteur, mais d'autres causes peuvent déclencher le phénomène ou l'amplifier.

- L'eau est un facteur très important, il est une cause très aggravante par l'action de la pression interstitielle, des forces hydrodynamiques, de la modification des caractéristiques mécaniques des sols fins.
- Les séismes pouvant être un facteur déclenchant des mouvements de terrain de très grandes ampleurs, spécialement pour les zones fortement sismiques.
- Les variations climatiques pluie, fonte des neiges, sécheresse, gel dégel, etc.
- L'érosion des sols superficiels non cohérents.
- La pente ; plus la pente est raide, plus le mouvement de terrain est accentué.

2.3. Classification des mouvements de terrain

La stabilité des pentes intéresse aussi bien les pentes naturelles que les talus artificiels. Toute étude de cette dernière doit être précédée d'une reconnaissance géologique très fine qui nous permet de mettre en évidence des hétérogénéités locales, plus d'autres facteurs (pendage des couches, circulations d'eau, etc.). On distingue, selon le type de terrain où ils se produisent, les mouvements suivants.

2.3.1. Talus artificiels

Sont essentiellement affectés par des glissements et parfois par des phénomènes de fluage. On peut les classer en fonctions des types d'ouvrages :

- Talus en déblais. (Figure 2.2)
- Talus en remblais sur sol compressible.
- Talus en remblais sur sol mou. (Figure 2.3)
- Ouvrages de soutènement vis-à-vis d'un glissement profond. (Figure 2.4)
- Stabilité des digues et des barrages en terre.

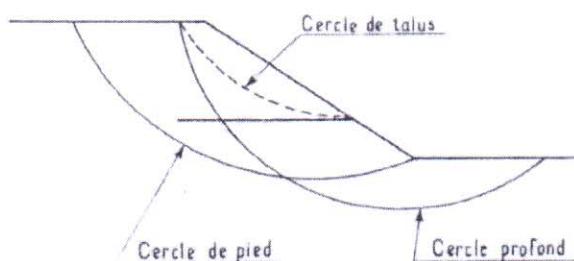


Figure 2.2. Différents types de rupture circulaire

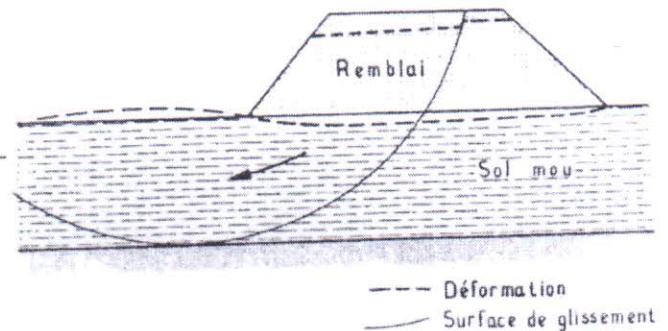


Figure 2.3. Remblai sur sol mou

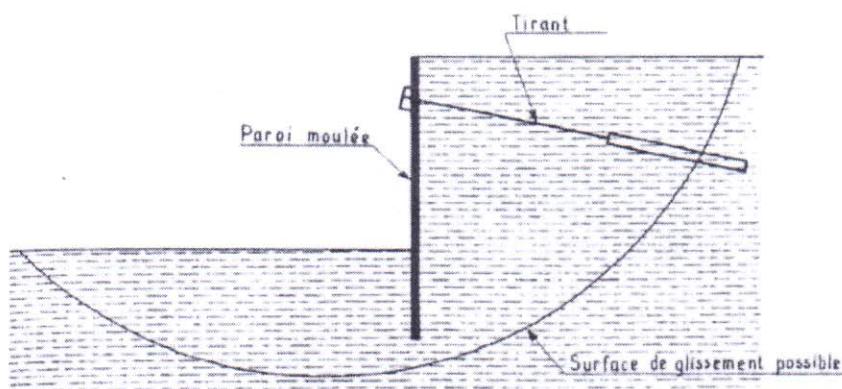


Figure 2.4. Rupture circulaire sous un soutènement

2.3.2. Pentes naturelles

On distingue,

- les glissements plans (Figure 2.5) ;
- les glissements rotationnels simple (Figure 2.6) ;
- les glissements rotationnels complexes : écroulements, fluages et solifluxions, coulées boueuses (Figure 2.7).

2.4. Description des principaux types des mouvements de terrains

2.4.1. Glissements

Les glissements affectent les sols ; ces mouvements ont lieu le long d'une surface définie. Les vitesses de rupture sont variables, dans certains cas la rupture est précédée de signes annonciateurs, dans d'autres cas, elle est brutale.

(a) *glissements plans* : qui s'effectue le long d'une surface de rupture sensiblement plane (Figure 2.5).

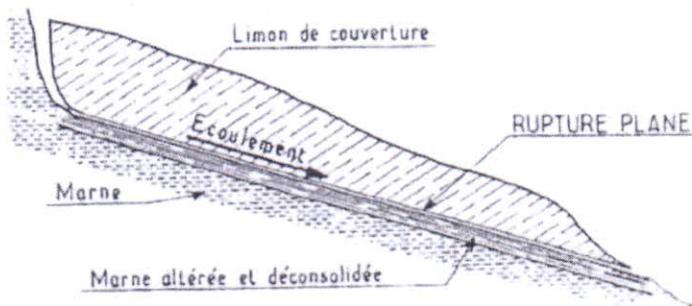
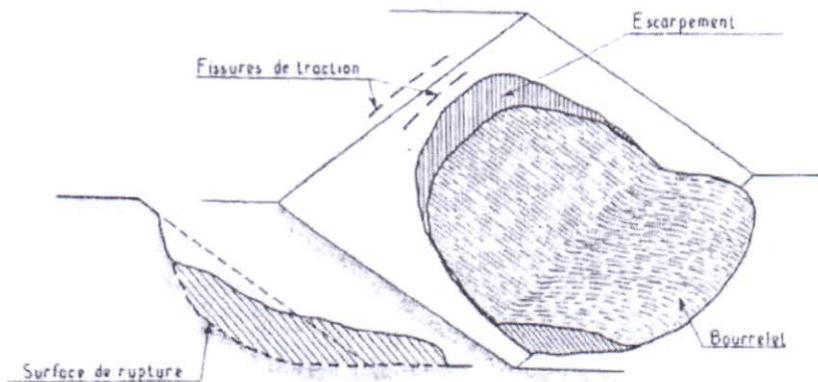


Figure 2.5. Glissement plan

(b) *glissements rotationnels simple* : est le plus fréquent. La surface de rupture a une forme simple semblable à un cylindre (Figure 2.6).



(a) Coupe longitudinale

(b) Perspective

Figure 2.6. Glissement rotationnel

(c) *glissements rotationnels complexe* : est un glissement multiple « emboîtés » les uns dans les autres. L'apparition du premier glissement, en bas de la pente, provoque une perte brutale de butée pour les terres situées au-dessus, et aussi des glissements successifs remontant vers l'amont. (Figure 2.7).

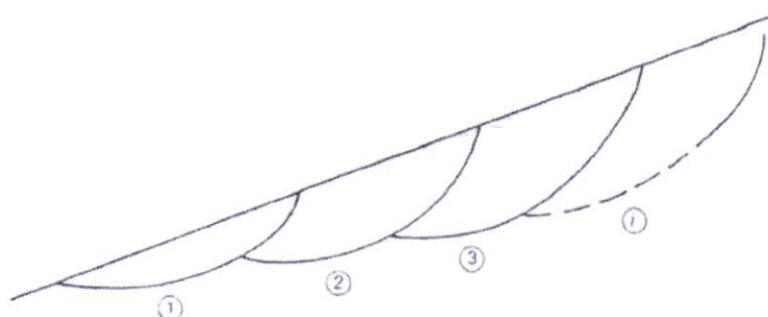


Figure 2.7. Glissements successifs emboîtés

2.4.2. Ecroulements

Concernent les massifs rocheux plus ou moins fracturés, qui vont se rompre progressivement par tassement, basculement, rupture de bancs rocheux, etc. Ils consistent en une chute de terrain rocheux se détachant d'une falaise sous l'action de la pesanteur, complétée ou non par une secousse sismique ou des surpressions d'eau, en général par manque d'appui à la base.

2.4.3. Fluages et solifluxions

(a) **Fluage** : correspond à des mouvements lents dus à des sollicitations proches de la rupture du sol. L'état ultime pouvant être soit la stabilisation, soit la rupture. (Figure 2.8)

(b) **Solifluxion** : c'est un cas particulier de fluage. C'est un phénomène superficiel provoqué par les variations volumiques du sol au cours des saisons (gel-dégel en montagnes, alternance de saisons sèches et pluvieuses). Elle se repère par la présence d'ondulations du sol et par l'inclinaison des arbres.

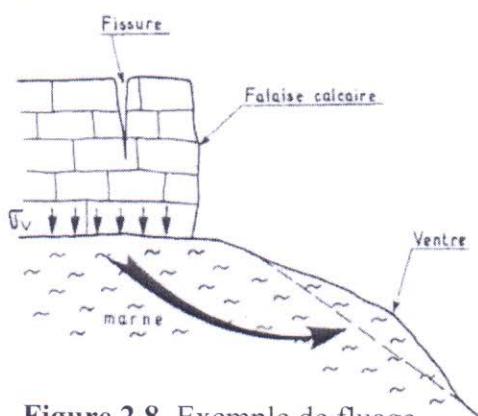


Figure 2.8. Exemple de fluage

2.4.4. Coulées boueuses

Dues aux infiltrations importantes d'eau, transportant des matériaux solides. Elles se produisent surtout en montagne. Elles sont caractérisées par leur très fort remaniement interne et par leur apparition dans les sols meubles ; l'extension peut être très grande surtout si la teneur en eau est importante.

2.5. Calcul de stabilité

2.5.1. Hypothèse de calcul

Il existe en principe deux possibilités pour calculer la stabilité d'une pente, la première, considère que la masse instable forme un bloc rigide et que le sol a un comportement rigide - plastique, et donc, qu'à la rupture tous les points de la masse stable atteignent en même temps leur seuil de rupture. C'est la méthode de calcul à la rupture. La seconde possibilité est l'application de la méthode des éléments finis en choisissant une loi de comportement complexe.

Parmi les méthodes de calcul à la rupture, on a :

- Les **méthodes globales** qui ne conviennent que pour des profils de talus simple en sol homogène et isotrope.
- Les **méthodes par tranches**, qui sont plus souples, le talus est partagé en tranches verticales, profile de talus non rectiligne, hétérogénéité du sol et la ligne de glissement quelconque.

Cette dernière s'appelle aussi « **méthode suédoise** » due à **Petterson** (1916) développée pour les ruptures circulaires par **Fellinius** en 1927, perfectionnée par la suite par **Bishop** en 1954, enfin adaptée aux ruptures non circulaires par **Nonveiller** en 1965.

2.5.2. Stabilité en rupture circulaire avec coefficient de sécurité global

2.5.2.1. Méthode des tranches de « Fellenius »

(a) En absence de nappe :

Dans cette méthode, on suppose que la surface de rupture potentielle est circulaire, est on néglige totalement les **efforts inter-tranches**, qui se divisent en efforts verticaux V_n et V_{n+1} et horizontaux H_n et H_{n+1} . Considérons un talus recouvrant un certain nombre de couches de sol de caractéristiques différentes : C_i , ϕ_i , γ_i . On veut déterminer le coefficient de sécurité F_s vis-à-vis du glissement, il est défini comme suit :

$$F_s = \sum \text{Moments résistants} / \sum \text{Moments moteurs}$$

Soit un cercle quelconque de centre « **O** » et de rayon « **R** ». Cette méthode consiste à diviser le volume concerné dans l'arc (**E.M.F**) en une série de tranches verticales (Figure 2.9). Dans cette Figure et à titre d'exemple « **n** » varie de 1 à 12.

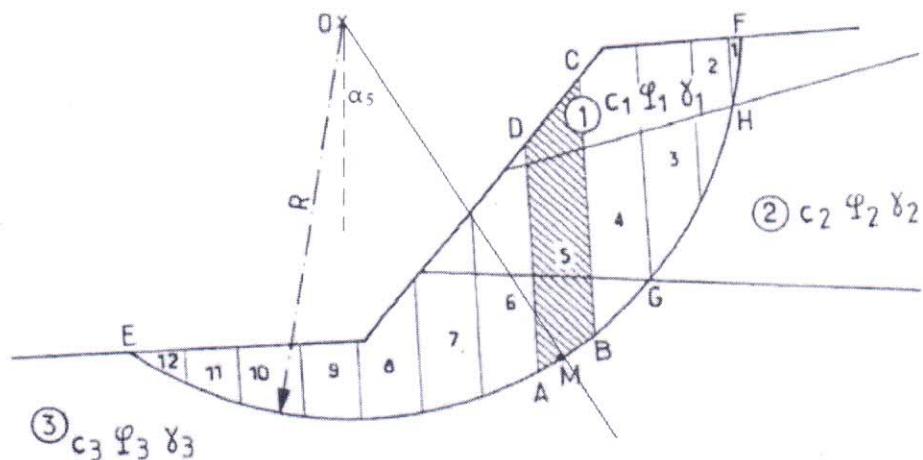
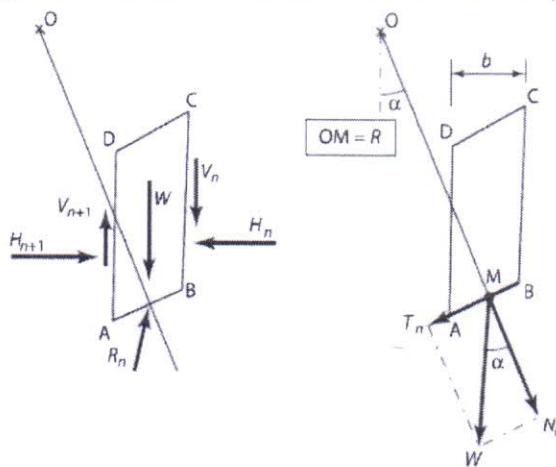


Figure 2.9. Découpage en tranches d'un talus

Etude de la tranche « A.B.C.D » affectée par l'indice « **n** » :

Les différentes forces qui agissent sur cette tranche sont les suivantes (Figure 2.10a) :



a) Décomposition complète

b) Hypothèse de Fellenius

Figure 2.10. Forces agissantes sur la tranche « **n** »

- W_i : poids de la tranche n , il se décompose en :
 - une force normale ($N_n = W_i \cos \alpha$) et une force tangentielle ($T_n = W_i \sin \alpha$).
- R_n (force résistante) : résistance du sol due à sa cohésion et son angle de frottement interne.
- Les réactions sur les faces verticales **BC** et **AD** décomposées en réactions horizontales : H_n et H_{n+1} , et en réactions verticales V_n et V_{n+1} .

- Par rapport au centre « **O** » on a (Figure 2.10b) :

Moment moteur : celui du poids des terres, de l'eau interstitielle et des surcharges éventuelles tendant à provoquer le glissement.

Moment résistant : celui des réactions s'opposant au glissement. Le moment résistant est fourni par la valeur maximale que peut prendre la composante tangentielle de R_n .

D'après Coulomb : $R_n = C_i \cdot AB + N_n \tan \phi_i$

La somme des moments résistants pour toutes les tranches sera : $\sum_{n=1}^{n=m} (C_i \cdot AB + N_n \tan \phi_i)$

Avec m le nombre total des tranches ; C_i et ϕ_i les caractéristiques mécaniques de la couche dans laquelle se trouve **AB**.

Le coefficient de sécurité global **Fs** est calculé comme suit :

$$Fs = \frac{\sum_{n=1}^{n=m} [C_i \cdot AB + N_n \cdot \tan \phi_i]}{\sum_{n=1}^{n=m} T_n} \quad (2.1)$$

Avec:

$$N_n = W_i \cos \alpha$$

$$T_n = W_i \sin \alpha$$

$$L = AB = b / \cos \alpha$$

▪ Cas d'un sol hétérogène (C_i, ϕ_i) :

$$\text{La relation (2.1) devient : } Fs = \frac{\sum_{n=1}^{n=m} \left[C_i \frac{b_i}{\cos \alpha_i} + W_i \cos \alpha_i \cdot \tan \phi_i \right]}{\sum_{n=1}^{n=m} W_i \sin \alpha_i} = \frac{\text{Moment résistant}}{\text{Moment moteur}} \quad (2.2)$$

▪ Cas d'un sol homogène ($C, \phi = Cte$) :

$$\text{La relation (2.2) devient : } Fs = \frac{C \cdot \sum_i \frac{b_i}{\cos \alpha_i} + \tan \phi \cdot \sum_{n=1}^{n=m} W_i \cos \alpha_i}{\sum_{n=1}^{n=m} W_i \sin \alpha_i} \quad (2.3)$$

Remarque : les paramètres géométriques intervenant dans le calcul de **Fs** sont les suivants :

- b : la largeur des tranches.
- α : l'angle orienté que fait le rayon du cercle passant par le milieu de la base de la tranche avec la verticale.
- h_m : la hauteur moyenne de la tranche pour le calcul du poids (W).

(b) En présence de nappe :

La prise en compte des écoulements est assez délicate. La méthode des tranches de Fellenius est appliquée en utilisant l'équation de Coulomb : $\tau = C + (\sigma - u) \cdot \operatorname{tg} \varphi$

■ Détermination de la pression intersticielle:

La pression intersticielle « u » en chaque point du massif de sol se détermine à partir du réseau d'écoulement. Considérons la tranche ABCD (Figure 2.9), la valeur de « u » est donnée par :

$$u = \gamma_w \cdot Z_w$$

Z_w est la distance entre le point M et le point N où l'équipotentielle passant par M recoupe la surface libre. Par définition de l'équipotentielle, les charges hydrauliques en M et en N sont identiques, on a donc :

$$u = (Z_n - Z_m) \gamma_w$$

■ Calcul du coefficient de sécurité global:

Soit W le poids total de la tranche ABCD, V_1 et V_2 les volumes de la part de la tranche au-dessus et au-dessous de la nappe d'eau (Figure 2.11):

$$W = \gamma_h \cdot V_1 + \gamma_{\text{sat}} \cdot V_2$$

N et T sont, respectivement, les composantes normale et tangentielle du poids W sur l'arc AB de la tranche ABCD (Figure 2.11).

La résistance maximale au cisaillement le long de AB est donnée par :

$$C_i \cdot AB + (N_n - u_i \cdot AB) \operatorname{tg} \varphi_i$$

La somme des moments résistants pour toutes les tranches est : $\sum_{n=1}^{n=m} C_i \cdot AB + (N_n - u_i \cdot AB) \operatorname{tg} \varphi_i$

$$\Rightarrow \mathbf{Fs} = \frac{\sum_{n=1}^{n=m} [C_i \cdot AB + (W_i \cdot \cos \alpha_i - u_i \cdot AB) \operatorname{tg} \varphi_i]}{\sum_{n=1}^{n=m} T_n} \quad (2.4)$$

$$\text{la relation devient: } \mathbf{Fs} = \frac{\sum_{n=1}^{n=m} [C_i \frac{b_i}{\cos \alpha_i} + (W_i \cdot \cos \alpha_i - \frac{u_i \cdot b_i}{\cos \alpha_i}) \operatorname{tg} \varphi_i]}{\sum_{n=1}^{n=m} W_i \cdot \sin \alpha_i} \quad (2.5)$$

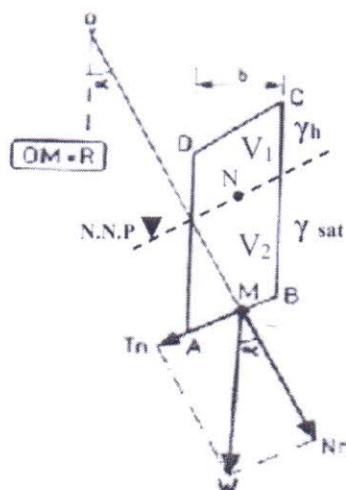


Figure 2.11. Forces agissantes sur une tranche « n » en présence de nappe

2.5.2.2. Méthode des tranches simplifiée de « Bishop »

Dans cette méthode, on suppose encore que la surface de rupture potentielle est circulaire. On découpe le sol en tranches élémentaires comme celle de **Fellenius**, en on adopte comme hypothèse qu'il y a seulement **une réaction horizontale entre les tranches** : H_n et H_{n+1} . Le coefficient de sécurité F_s s'écrit comme suit :

(a) En absence de nappe :

$$F_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=m} [C_i \cdot b_i + W_i \cdot \tan\varphi_i] \cdot \frac{1}{\cos\alpha_i [1 + (\tan\alpha_i \cdot \frac{\tan\varphi_i}{F})]}}{\sum_{n=1}^{n=m} W_i \cdot \sin\alpha_i} \quad (2.6)$$

(b) En présence de nappe :

$$F_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=m} [C_i \cdot b_i + (W_i - u \cdot b_i) \cdot \tan\varphi_i] \cdot \frac{1}{\cos\alpha_i [1 + (\tan\alpha_i \cdot \frac{\tan\varphi_i}{F})]}}{\sum_{n=1}^{n=m} W_i \cdot \sin\alpha_i} \quad (2.7)$$

2.5.3. Stabilité en rupture plane (glissement plan)

Soit une pente indéfinie d'inclinaison β dans un sol ayant pour caractéristiques γ le poids volumique au-dessus de la nappe, γ_{sat} le poids volumique saturé au-dessous de la nappe, C et φ qui sont la cohésion et l'angle de frottement interne du sol, respectivement.

La nappe est située sur une hauteur h_w et s'écoule parallèlement à la pente ce qui est le cas le plus courant (Figure 2.12).

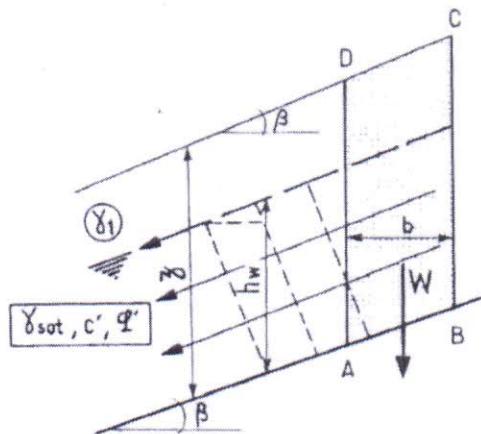


Figure 2.12. Glissement plan

(a) En absence de nappe : $F_s = \frac{C + \gamma \cdot h \cdot \cos^2\beta \cdot \tan\varphi}{\gamma \cdot h (\sin\beta \cdot \cos\beta)} \quad (2.8)$

(b) En présence de nappe : $F_s = \frac{C + (\sum_i \gamma_i \cdot h_i - \gamma_w \cdot h_w) \cdot \cos^2\beta \cdot \tan\varphi}{\sin\beta \cdot \cos\beta \cdot \sum_i \gamma_i \cdot h_i} \quad (2.9)$

2.5.4. Recherche de coefficient de sécurité minimal

Pour donner une valeur précise du facteur de sécurité (F_s), on commence par diverses lignes de glissements possibles et on cherche pour quelle ligne on obtient la valeur la plus faible de F_s , puisque c'est le long de cette surface de glissement que la rupture se produira.

Il n'y a pas de méthode précise pour définir, a priori, la position de ce cercle critique. Il faut procéder par tâtonnement en calculant le coefficient de sécurité F_s pour un nombre suffisant de cercles, et ceci en quadrillant les surfaces de rupture géométriquement compatibles avec la topographie des lieux (Figure 2.13).

Dans le cas général, il y a beaucoup de possibilités car :

- Pour un cercle donné, on peut faire varier le rayon du cercle.
- La possibilité du centre peut varier horizontalement et verticalement.
- Pour chaque centre de cercle, on porte le F_s calculé.

Il est ensuite possible de tracer des courbes d'iso-facteur de sécurité et de définir la valeur la plus faible donnant la valeur recherchée du coefficient de sécurité globale.

La recherche du coefficient de sécurité nécessite souvent le calcul de nombreux cercles, opération particulièrement fastidieuse si elle est faite manuellement. Le calcul manuel n'est plus utilisé qu'à des fins didactiques. Des logiciels de calcul spécifique (Geoslope/ Talren/ LimitStateGeo,..etc.) effectuent cette opération de manière automatique.

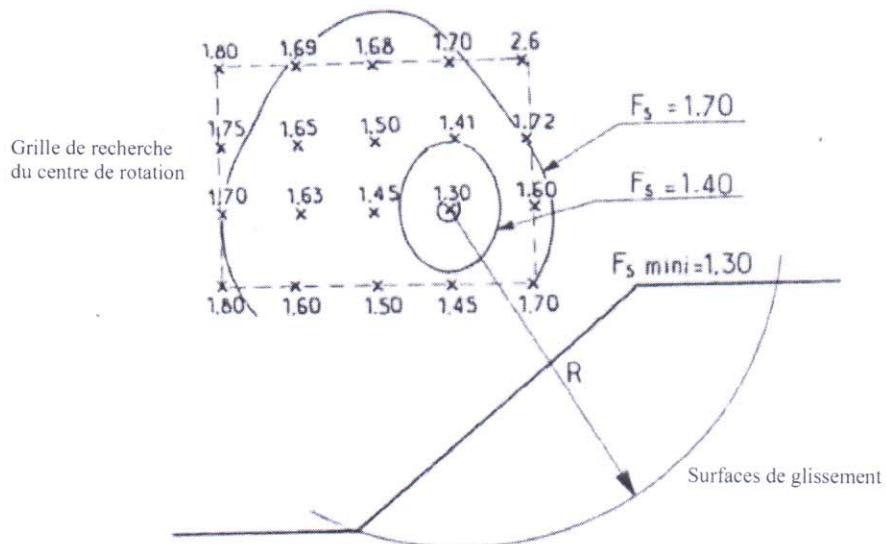


Figure 2.13. Facteur de sécurité minimal

Les spécialistes estiment que :

- Le talus est **stable**, si : $F_s \geq 1,5$
- Le glissement est pratiquement **inévitable (talus instable)**, si : $F_s < 1$
- Le talus est **douteux**, si : $1 \leq F_s < 1,5$