

Chapitre 3

Stabilité des pentes en rupture quelconque

3.1 Introduction

La morphologie particulière de certains sites présentant des zones de faiblesse mécanique conduit parfois à envisager des surfaces de glissement probables qui ne sont ni circulaires ni planes : elles sont appelées surfaces de rupture quelconque.

On présente dans ce chapitre les différentes méthodes couramment utilisées pour étudier la stabilité au glissement quelconque ainsi que les outils pour planifier et réaliser des projets d'analyse de stabilité. On focalise par la suite sur les méthodes d'équilibre limite, et plus particulièrement celles de l'analyse des tranches verticales, sur lesquelles sont basés les différents logiciels d'analyse de la stabilité au glissement, utilisés en pratique. La définition de quelques solutions confortatives sera également évoquée.

3.2 Méthodes de calcul de stabilité

Les méthodes d'analyse de la stabilité des pentes vis-à-vis du glissement sont subdivisées en trois grandes catégories [10] :

- méthodes d'équilibre limite,
- méthodes d'éléments finis,
- méthodes des caractéristiques de contraintes (ou des lignes de glissement).

On focalise l'étude ci-après sur la première catégorie qui comporte d'ailleurs les méthodes de calcul les plus utilisées en pratique. On s'intéresse dans cette catégorie aux méthodes des tranches qui forment la base des logiciels courants de calcul automatique. Les méthodes des tranches les plus connues sont représentées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 Méthodes des tranches courantes pour la rupture quelconque [3] [13]

Méthode	Hypothèses Simplificatrices	Remarques
Janbu	$b_i = h_i/3$ $\beta_i = const.$	Méthode relativement adéquate et conseillée pour les surfaces de glissement allongées, où les hypothèses sont assez bien vérifiées. Calcul à l'ordinateur
Janbu simplifiée	$b_i = h_i/3$ $\beta_i = const.$ $V_i = V_{i+1}$	Comme Janbu, mais en plus on néglige les différences dans les efforts de cisaillement entre deux côtés d'une tranche. <i>Le calcul est possible à la main.</i> Cette méthode est très populaire dans la pratique
Morgenstern et Price	$tg\beta_i = \lambda f(x)$	Méthode rigoureuse. L'utilisateur doit spécifier $\lambda f(x)$. Calcul à l'ordinateur
Spencer	$tg\beta_i = \frac{H_i}{V_i} = \frac{H_{i+1}}{V_{i+1}}$	Les forces intertranches sont parallèles. Calcul à l'ordinateur
Bell	$\sigma = \lambda\gamma h + \mu \sin\left(\pi \frac{x - x_0}{x_1 - x_0}\right)$	Hypothèse sur la répartition des contraintes normales le long de la surface de rupture. Calcul à l'ordinateur
Sarma	$V = ch + Htg\varphi$	Hypothèse sur la répartition des forces intertranches verticales. Cette méthode comprend des forces sismiques. Calcul à l'ordinateur
Raulin et Toubol	$\sigma = \sigma_0(\lambda + \mu tg\alpha)$	Hypothèse sur la répartition des contraintes normales le long de la surface de rupture. Calcul à l'ordinateur

Le principe de base de ces méthodes est que la stabilité est une fonction des contraintes agissant sur une surfaces de glissement potentielle, et que ces contraintes sont essentiellement proportionnelles au poids des terres en dessus de la surface de glissement. Il est ainsi proposé de découper le massif en n tranches verticales de faibles largeurs (figure 3.1), de calculer les forces qui y règnent et d'utiliser ce résultat pour évaluer la sécurité globale au glissement. Une tranche délimite une portion homogène de la surface de glissement le long de laquelle il est admis des paramètres de résistance constants.

On se limite ci-après à l'étude des méthodes de Janbu, et de Raulin et Toubol.

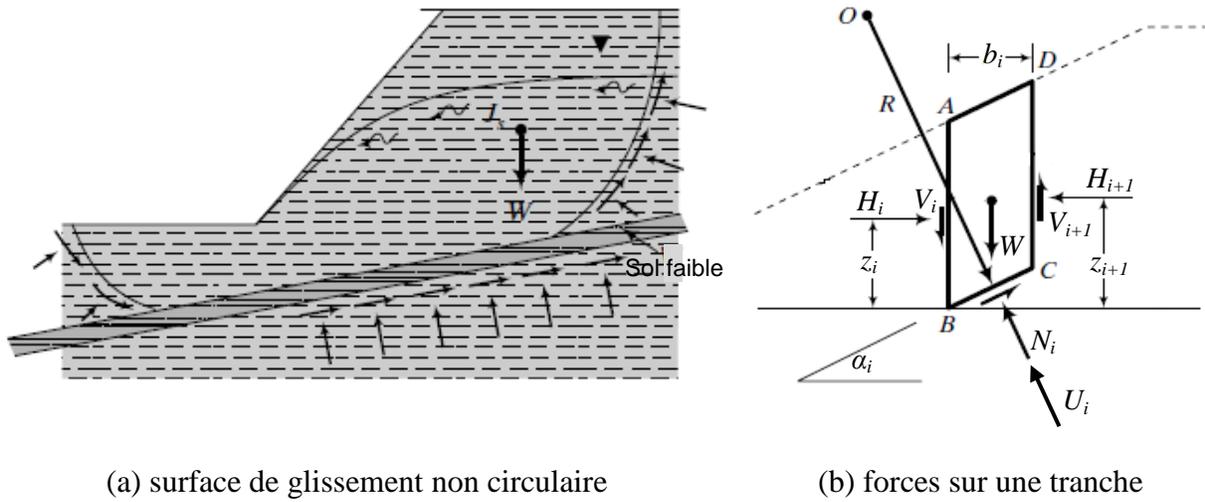


Figure 3.1 Surface de rupture quelconque et les forces agissant sur une tranche de sol [3]

3.3 Méthode de Janbu

Janbu (1973) a supposé une surface de glissement non circulaire (figure 3.2a). Les forces agissant sur une tranche sont représentées sur la figure 3.2b.

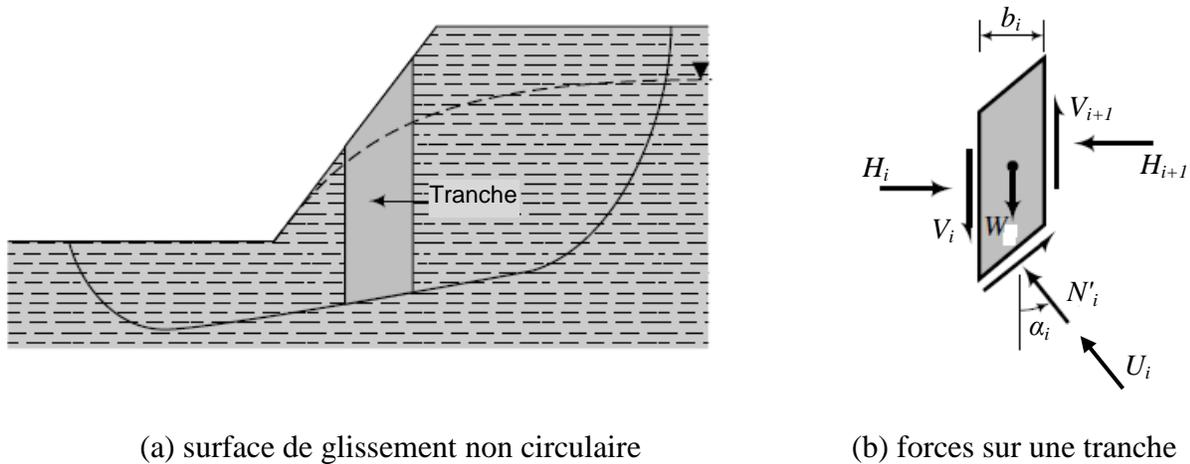


Figure 3.2 Surface de rupture proposée par Janbu et les forces sur une tranche de sol [3]

Les équations d'équilibre s'écrivent :

$$\begin{aligned}
 \Delta H_i + T_i \cos \alpha_i - N_i \sin \alpha_i &= 0 \\
 -W_i + N_i \cos \alpha_i + T_i \sin \alpha_i + \Delta V_i &= 0
 \end{aligned}
 \tag{3.1}$$

avec

$$\Delta H_i = H_{i+1} - H_i$$

$$\Delta V_i = V_{i+1} - V_i$$

$$N'_i = N_i + U_i$$

En multipliant la première équation de (3.1) par $\cos\alpha_i$ et la deuxième par $\sin\alpha_i$ et en sommant, il est trouvé :

$$\Delta H_i = \frac{T_i}{\cos\alpha_i} - (W_i - \Delta V_i)tg\alpha_i$$

Janbu fait l'hypothèse que la somme des ΔH_i s'annulent sur l'ensemble du glissement, soit que

$$\sum_{i=1}^n \Delta H_i = 0$$

ce qui donne par substitution :

$$\sum \frac{T_i}{\cos\alpha_i} = \sum (W_i - \Delta V_i)tg\alpha_i$$

Ci-dessus, l'expression représente bien l'ensemble des forces motrices à prendre en compte dans l'équation du coefficient de sécurité global.

L'expression équivalente pour les forces résistantes est en conséquence :

$$\text{Forces résistantes} = \sum \frac{T_{if}}{\cos\alpha_i}$$

dans laquelle l'expression de $T_{if}/(\cos\alpha_i)$ est :

$$T_{if} = \tau_{if} \frac{b_i}{\cos\alpha_i} \quad (3.2)$$

où la contrainte de cisaillement à la rupture s'écrit, avec Mohr-Coulomb :

$$\tau_{if} = c'_i + \sigma'_i tg\varphi'_i$$

et

$$\sigma'_i = \frac{N'_i}{b_i/\cos\alpha_i} = \frac{N_i - U_i}{b_i/\cos\alpha_i} = \frac{N_i}{b_i/\cos\alpha_i} - u_i$$

dans laquelle la force N_i exprimée selon la deuxième équation d'équilibre (3.1) :

$$N_i = \frac{W_i - \Delta V_i}{\cos\alpha_i} - T_i tg\alpha_i$$

et par définition :

$$T_i = \frac{1}{F_s} T_{if}$$

En substituant les équations ci-dessus dans l'équation (3.2) on trouve :

$$\frac{T_{if}}{\cos \alpha_i} = [c'_i b_i + [(W_i - \Delta V_i) - u_i b_i] \operatorname{tg} \varphi'_i] m_i \cos \alpha_i$$

avec

$$m_i = \frac{1}{\cos \alpha_i + \frac{1}{F_s} \operatorname{tg} \varphi'_i \sin \alpha_i}$$

En substituant les expressions pour les forces motrices et les forces résistantes, on trouve finalement la formule de Janbu :

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n [c'_i b_i + [(W_i - \Delta V_i) - u_i b_i] \operatorname{tg} \varphi'_i] m_i \cos \alpha_i}{\sum_{i=1}^n (W_i - \Delta V_i) \operatorname{tg} \alpha_i} \quad (3.3)$$

Dans cette équation on retrouve F_s à gauche et à droite (dans m_i) et ceci nécessite quelques itérations comme pour la méthode de Bishop. Ici de plus, la présence de l'inconnue ΔV_i demande une approche par estimation et corrections progressives.

Janbu a proposé une approche plus simple, avec laquelle une solution peut être obtenue par un calcul à la min. Pour ce faire, on négligera les différences de forces de cisaillement inter-tranches ($\Delta V_i = 0$) mais le coefficient de sécurité sera corrigé d'un facteur correctif empirique f_0 fonction du rapport d'élongation d/l de la pente (figure 3.3). C'est la formule de Janbu simplifiée :

$$F_s = \frac{f_0 \sum_{i=1}^n [c'_i b_i + (W_i - u_i b_i) \operatorname{tg} \varphi'_i] m_i \cos \alpha_i}{\sum_{i=1}^n W_i \operatorname{tg} \alpha_i} \quad (3.4)$$

La méthode de Janbu simplifiée appelle les commentaires suivants [13] :

- le facteur correctif f_0 est très proche de l'unité, en particulier pour les pentes allongées.
- selon Janbu, la méthode simplifiée donne des coefficients de sécurité légèrement plus faible (5-8%) que la méthode complète : elle se situe donc du côté de la sécurité.

- la formule de Janbu simplifiée est très proche de celle de Bishop simplifiée, à part quelques effets différents provenant de l'angle de la surface de glissement à la base de la tranche, α_i . Pour des surfaces de rupture peu inclinées, cette influence devient négligeable ($\cos\alpha_i \cong 1$) et les deux méthodes convergent.
- la procédure de calcul est la même pour Janbu que pour Bishop et le calcul est possible avec un simple tableur (tableau 3.2).

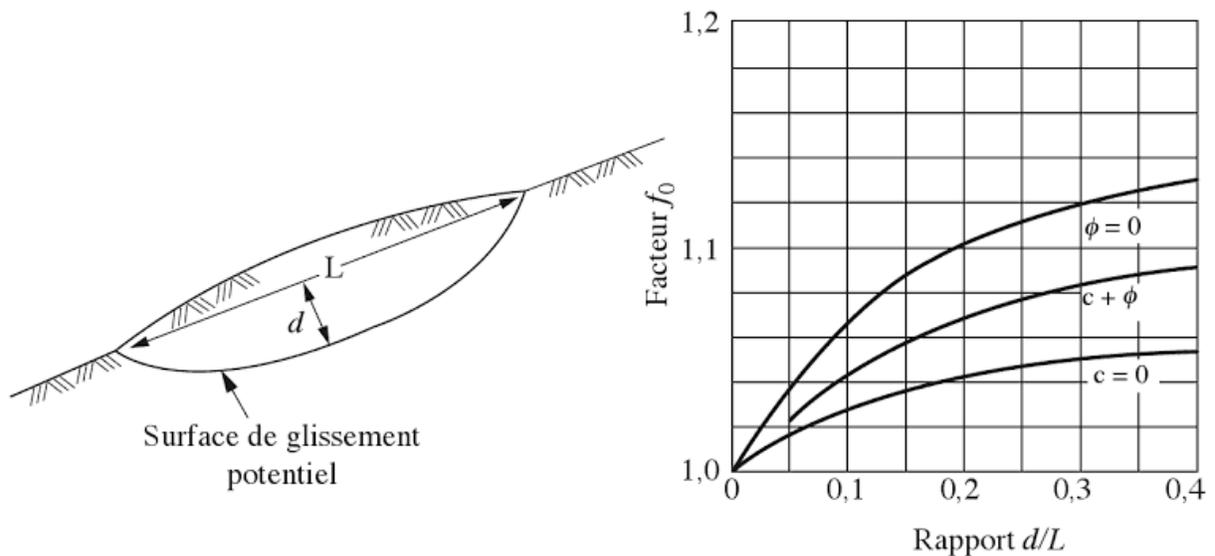


Figure 3.3 Facteur correctif f_0 pour la méthode de Janbu simplifiée [13]

La procédure de calcul est donc la suivante :

1. dessin/choix d'une surface de glissement,
2. choix de la valeur initiale de F_s pour estimer m_i (par exemple $F_s = 1$),
3. calcul F_s selon la formule de Janbu simplifiée (équation 3.4),
4. test de convergence de F_s : si non atteinte, reprendre au point 3 avec la dernière valeur de F_s pour l'estimation de m_i . Si la convergence est atteinte, aller au point 5,
5. fin du calcul.

Tableau 3.2 Tableau pour le calcul par la méthode de Janbu simplifiée

Ligne	Terme	Tranche					Total
		1	2	3	<i>i</i>	<i>n</i>	
(1)	c'_i						
(2)	φ'_i						
(3)	b_i						
(4)	α_i						
(5)	u_i						
(6)	W_i						
(7)	$c'_i b_i$						
(8)	$u_i b_i$						
(9)	$W_i \operatorname{tg} \alpha_i$						$\sum A$
(10)	(6) - (8)						
(11)	(10) · $\operatorname{tg} \varphi'_i$						
(12)	(7) + (11)						
	$F_{s0} = \dots$						
(13)	$m_i \cos \alpha_i$						
(14)	(12) · (13)						$\sum B$
	$F_s = f_0 \sum B / \sum A = \dots$						
(15)	$m_i \cos \alpha_i$						
(16)	(12) · (15)						$\sum B$
	$F_s = f_0 \sum B / \sum A = \dots$						
	Etc. jusqu'à convergence						

3.4 Méthode de Raulin et Toubol

Une autre méthode de calcul, utilisée dans le cas d'une surface de rupture de forme quelconque, est la méthode dite des perturbations de Raulin et Toubol (1974) [14]. La répartition de la contrainte normale n'est pas constante le long de la courbe de rupture. Cette méthode globale exprime l'équilibre de tout le massif limité par la surface de rupture ; ce massif est soumis à son poids et à la résultante de toutes les contraintes σ et τ le long de la surface de rupture

(figure 3.4). Elle est basée sur la simple résolution des équations de l'équilibre statique avec ajustement automatique de la distribution de la contrainte normale obtenue par une perturbation de la contrainte normale de Fellenius le long de la courbe de rupture. Celle-ci s'écrit :

$$\sigma = \sigma_0(x)(\lambda + \mu v)$$

σ_0 est une valeur initiale approchée, prise généralement égale à $\gamma h \cos^2 \alpha$, soit celle de la méthode de Fellenius. Les paramètres λ et μ sont deux inconnues à déterminer, et v est appelé *paramètre de la perturbation*, pris couramment égal à $t g \alpha$.

Le principe de cette méthode est d'analyser *l'équilibre global du terrain* qui se traduit par les équations suivantes (figure 3.4) :

$$\begin{aligned} \sum F_x = 0 & \text{ donne } \int_{x_0}^{x_1} (\sigma t g \alpha - \tau) dx = 0 \\ \sum F_y = 0 & \text{ implique } \int_{x_0}^{x_1} (\sigma + \tau t g \alpha) dx - \int_{x_0}^{x_1} \gamma h dx = 0 \\ \sum M_{/o} = 0 & \text{ aboutit à } \int_{x_0}^{x_1} \sigma (x - y t g \alpha) dx + \int_{x_0}^{x_1} \tau (y + x t g \alpha) dx - \int_{x_0}^{x_1} \gamma h dx = 0 \end{aligned} \quad (3.5)$$

Le facteur de sécurité s'écrit alors :

$$F = \frac{\tau_l}{\tau} = \frac{c + \sigma t g \varphi}{\tau} \quad (3.6)$$

Le problème consiste alors, après discrétisation en tranches verticales, à résoudre un système de 4 équations qui peut se simplifier et se réduire en un ensemble de 3 équations à 3 inconnues, à savoir λ , μ et F .

Il s'agit d'un système non linéaire d'équations dont la résolution se fait par une méthode itérative [14]. En pratique, le calcul à partir des méthodes de tranches est mené à la base des programmes sur ordinateur. certains d'eux offrent une bibliothèque riche des méthodes de calcul, avec introduction des données du problème d'une manière conviviale et interactive.

On cite à ce titre le logiciel canadien GEO-SLOPE, qui offre à l'utilisateur un environnement très convivial ainsi qu'une bibliothèque de 8 méthodes de calcul à la rupture (Fellenius, Morgenstern et Price, Spencer, Bishop, etc), ainsi que la possibilité d'étudier le problème par la méthode des éléments finis. TELREN est un autre logiciel qui offre diverses méthodes de calcul interactif (méthodes de Fellenius, Bishop et Perturbations) avec possibilité d'étudier le renforcement du sol par tirants d'ancrages ou par clouage.

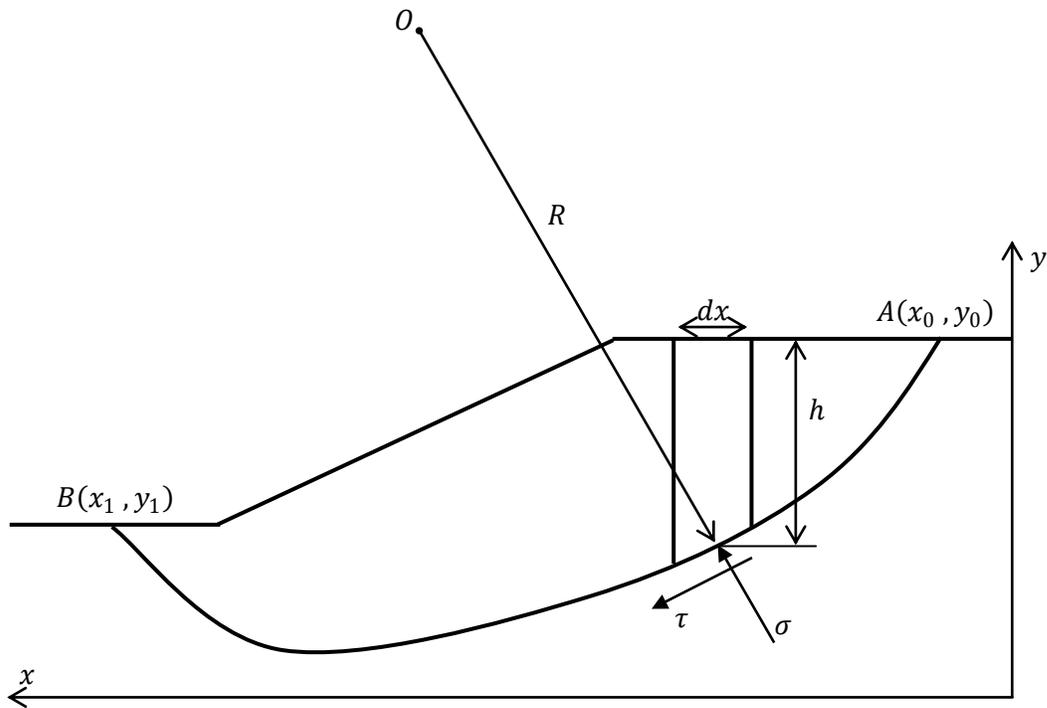


Figure 3.4 Schéma d'équilibre du talus dans la méthode de perturbations

3.5 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis permet de discrétiser le plan vertical du talus en des éléments caractérisés par un comportement élasto-plastique, et à propriétés physiques variables dans l'espace. Cette méthode ne tient pas compte de la notion du facteur de sécurité et se propose d'évaluer les contraintes et déformations aux nœuds des éléments. Le calcul peut être mené avec tout programme général d'éléments finis, ou avec les logiciels spécialisés dans la modélisation géotechnique, tel que Plaxis, Oasys, Cesar et Crisp [10].

3.6 Méthodes de confortement des talus

Pour améliorer la stabilité des talus ; il est possible d'agir de trois façons [1] [2] :

- modifier le profile en travers du talus,
- dispositifs de drainage,
- renforcer la résistance.

3.6.1 Modifier le profile en travers du talus

Les conditions de stabilité étant directement liées à la pente du terrain, le terrassement reste le moyen d'action le plus naturel. On peut distinguer trois groupes de méthodes de stabilisation par terrassement [2] :

- les actions sur l'équilibre des masses : allègement en tête, remblai en pied,
- les actions sur la géométrie de la pente : purge et reprofilage,
- les substitutions partielles ou totales de la masse instable.

La figure 3.5 schématise les différentes actions de terrassement et les termes généralement employés pour les décrire.

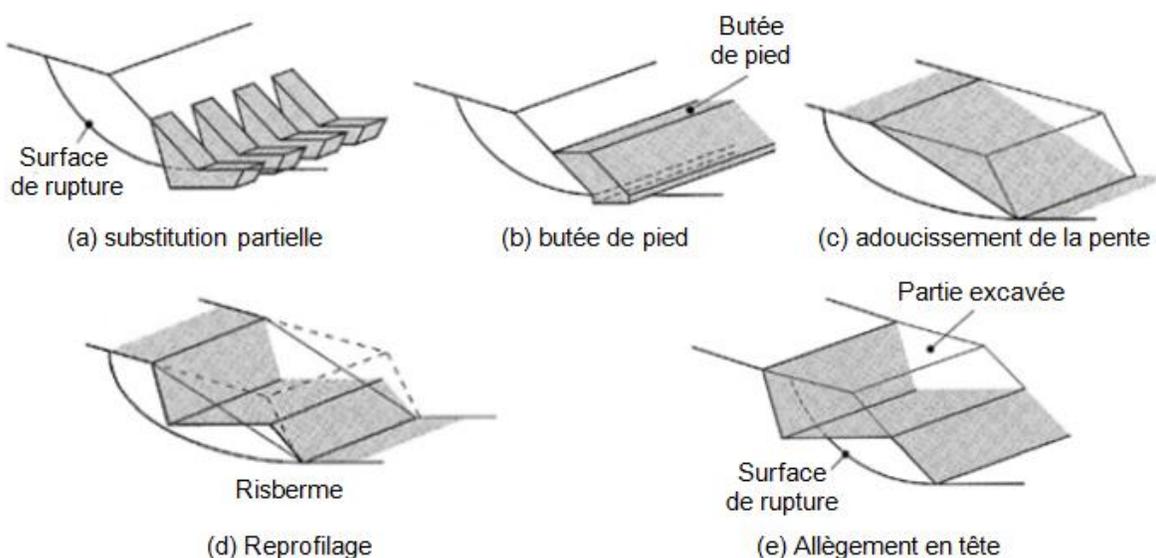


Figure 3.5 Différentes méthodes de stabilisation par terrassement [2]

3.6.2 Dispositifs de drainage

Dans la plupart des cas de glissement, l'eau joue un rôle moteur déterminant. Aussi utilise-t-on couramment les techniques de drainage, qui ont pour but de réduire les pressions interstitielles, au niveau de la surface de rupture lorsque celle-ci existe. C'est donc en termes de diminution de pression interstitielle, et non de débit d'exhaure, qu'il faut évaluer l'efficacité d'un dispositif de drainage [1] [2].

Les différentes techniques qui peuvent être mises en œuvre pour atteindre cet objectif relèvent de deux options fondamentales :

- éviter l'alimentation en eau du site,
- expulser l'eau présente dans le massif instable.

Comme la plupart des ouvrages, les dispositifs de drainage nécessitent un entretien régulier qui, s'il n'est pas réalisé, peut leur enlever toute efficacité. On distingue :

- le drainage superficiel (fossés, descentes d'eau, etc.) qui a pour effet de recueillir les eaux de ruissellement et d'empêcher l'érosion superficielle et l'infiltration de ces eaux,
- le drainage profond qui a pour but de rabattre la nappe, donc de l'éloigner de la surface du talus et d'orienter les lignes de courant d'une façon plus favorable.

En ce qui concerne le drainage profond, différents systèmes sont utilisés, tels que (figures 3.6 et 3.7) :

- les tranchées drainantes,
- les éperons drainants et masques drainants (éperon continu),
- les drains subhorizontaux.

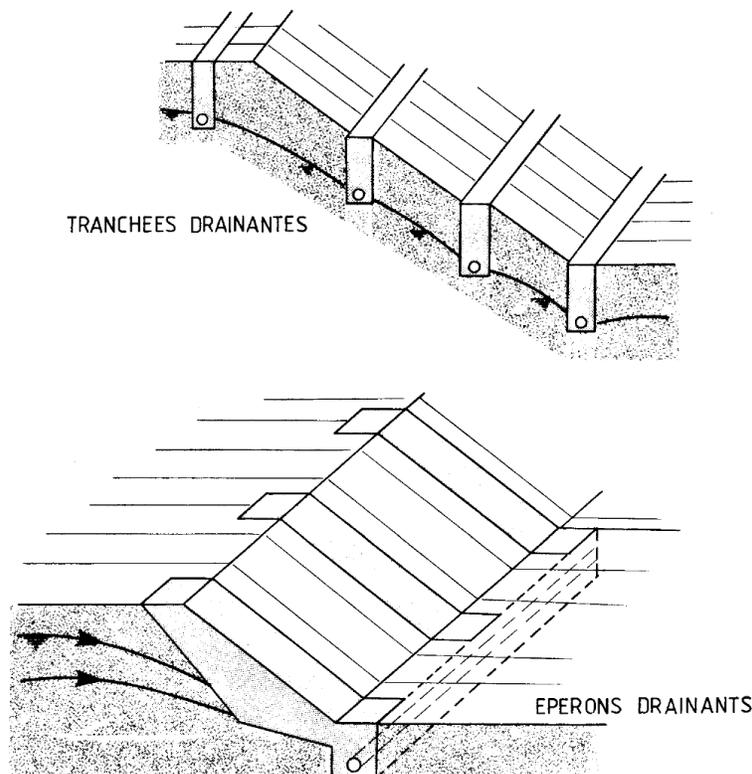


Figure 3.6 Tranchées et éperons drainants [1]

Les éperons drainants présentent des avantages certains sur les tranchées :

- ils jouent souvent un rôle mécanique, en s’opposant au glissement, s’ils sont constitués par un matériau à fort angle de frottement interne,
- leur exécution présente moins de risques,
- s’il y a amorce de glissement, la pente longitudinale du fil d’eau d’une tranchée drainante ne sera plus correcte : il risque de se former un point bas au droit de l’amorce de rupture entraînant une alimentation en eau, donc un résultat inverse de celui escompté. Ce phénomène n’est pas à craindre avec les éperons.

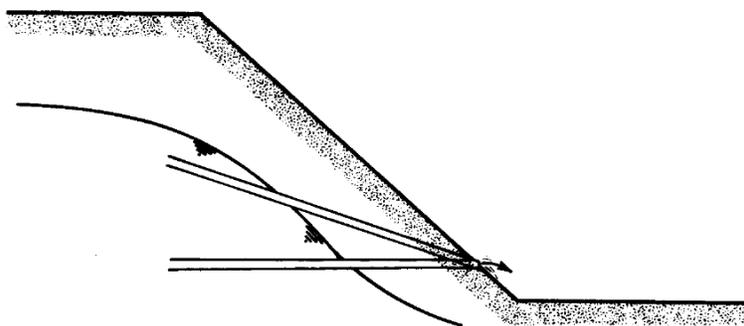


Figure 3.7 Drains subhorizontaux [1]

Toutes ces techniques peuvent être utilisées seules ou associées, ou en complément d’autres techniques de stabilisation.

3.6.3 Renforcer la résistance

On entend par éléments résistants les structures telles que [1] [2] :

- murs de soutènement,
- tirants d’ancrage et murs ancrés,
- clouages par des barres, des micropieux,
- rangées de pieux, de barrettes ou de profilés métalliques.

Ces techniques ne s’attaquent pas à la cause des mouvements mais visent à réduire ou à arrêter les déformations. Elles sont intéressantes dans les cas où les solutions curatives (terrassements et drainages) ne peuvent pas être techniquement ou économiquement mises en œuvre.