

# STABILITE DES PENTES ET DES TALUS

## 1 Introduction

On entend par "stabilité des pentes" l'étude de l'équilibre mécanique des masses de sol ou de roches pouvant être mises en mouvement, soit par des phénomènes naturels : érosion des versants montagneux, tremblement de terre ou anthropiques (Causé par les activités humaines) : terrassements de déblais, mise en œuvre de remblais, constructions.

Les mouvements et glissements de terrain sont très souvent des accidents graves de grande ampleur qui provoquent des dégâts matériels considérables et peuvent causer des pertes en vies humaines.

On peut distinguer les problèmes classiques d'instabilité à l'échelle des travaux : barrages, digues, talus ... qui intéressent des volumes de sol de l'ordre de la dizaine de milliers de  $m^3$ , des mouvements de grande ampleur en montagne qui affectent des millions de  $m^3$ .

Les mécanismes de rupture des pentes naturelles peuvent être distingués par:

- Ecoulement;
- Glissements plan, rotationnel ou complexe
- Coulées boueuses ou argileuses
- fluages

Les talus artificiels sont principalement affectés par des glissements et parfois de fluage. Ils peuvent être classés comme suit en fonction des types d'ouvrages:

- Talus en remblai ou en déblai
- Ouvrages de soutènement vis-à-vis du glissement général (profond)

- Dignes et barrages en terres

Toute étude de stabilité doit être précédée d'une reconnaissance géologique et géotechnique très fine qui permet le plus souvent de mettre en évidence les facteurs favorisant l'instabilité du terrain à savoir : hétérogénéités locales, pendage favorable au glissement, fissures, circulation d'eau,.. etc. Etant donné que ces facteurs ne sont pas toujours quantifiables, l'estimation de la sécurité réelle vis-à-vis du risque de rupture est très délicate quelle que soit l'approche utilisée.

Cependant une longue expérience a été acquise tant dans les méthodes de calcul que dans les techniques de stabilisation, de telle sorte que les problèmes de stabilité de pentes peuvent maintenant être résolus avec une assez bonne fiabilité.

Dans leur principe, les mouvements de terrain sont bien compris: ils surviennent lorsque la résistance des terrains est inférieure aux efforts moteurs engendrés par la gravité et l'eau souterraine ou par les travaux de l'homme; leur dynamique répond naturellement aux lois de la mécanique.

Dans la pratique cependant, les choses sont très complexes, du fait des incertitudes:

- sur les conditions initiales, notamment en profondeur;
- sur les propriétés mécaniques des terrains, en général hétérogènes, non linéaires, anisotropes, discontinus;
- sur les conditions hydrauliques: position de la nappe, phénomènes se produisant en zone non saturée; l'eau est la cause déclenchante de la plupart des mouvements; c'est un facteur variable dans le temps.

Ce chapitre met en évidence le mécanisme qui conduit à la rupture de certains talus ou pentes naturelles. Les méthodes de calcul les plus courantes permettant d'évaluer la stabilité des pentes et talus sont décrites en utilisant le concept de coefficient de sécurité global.

## **2 Description du phénomène**

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

L'eau sera, très souvent, 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 pourront être un facteur déclenchant de mouvements de terrain de très grandes ampleurs, spécialement bien entendu pour les zones fortement sismiques.

Les variations climatiques : pluie, fonte des neiges, sécheresse, gel-dégel.

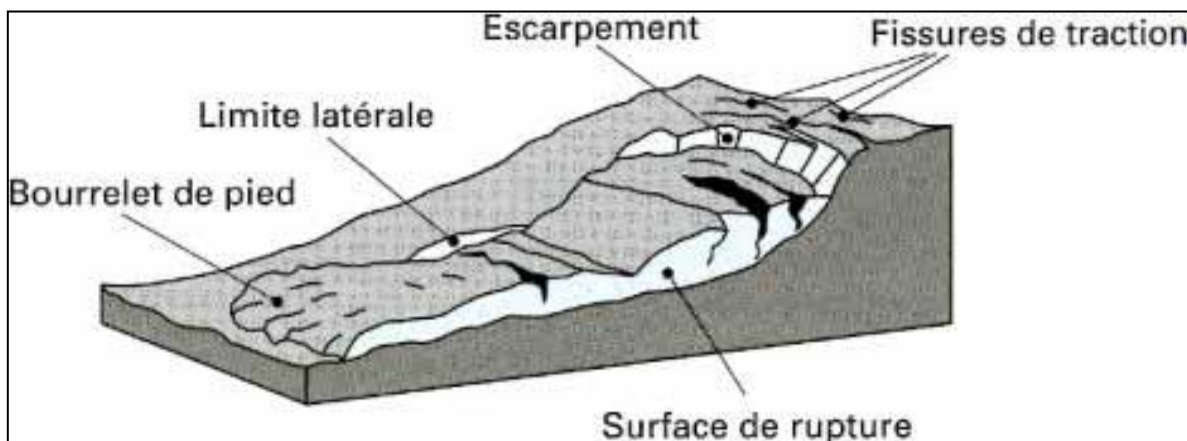
L'érosion des sols superficiels non cohérents, mais aussi l'érosion des falaises littorales.

On distingue trois grandes catégories de mouvements de terrain :

- les affaissements et effondrements de massifs sous minés;
- les écroulements (roches);
- les glissements (roches et sols).

Plus le mouvement de terrain prévisible est important, plus les études géologiques, hydrologiques et hydrogéologiques devront être poussées, tout

calcul de stabilité de pentes devenant illusoire s'il ne prend pas en compte l'ensemble de ces données.



**Figure 1** – Principaux éléments de description d'un glissement de terrain

### **3 Description des principaux types de mouvements de terrain**

Les mouvements de terrain sont très variés, par leur nature (glissements de terrains, éboulements rocheux, coulées de boues, effondrements de vides souterrains, affaissements, gonflement ou retrait des sols, ...) et par leur dimension (certains glissements peuvent atteindre plusieurs dizaines de millions de m<sup>3</sup>).

Leur répartition spatiale est guidée par la topographie, par la géologie (nature et fracturation des formations affleurantes, hydrogéologie) et éventuellement par l'action de chargement, c'est-à-dire par l'environnement physique. En effet, une bonne connaissance de la géologie donne une information sur la sensibilité du site et donc sur le volume des investigations ultérieures; elle donne aussi une information sur la forme de la surface potentielle de rupture et l'homogénéité ou non des couches du sous sol, ce qui va influencer le choix de la méthode de calcul.

Selon la morphologie, les mouvements de terrain peuvent être scindés comme suit:

### 3.1 Affaissements et effondrements.

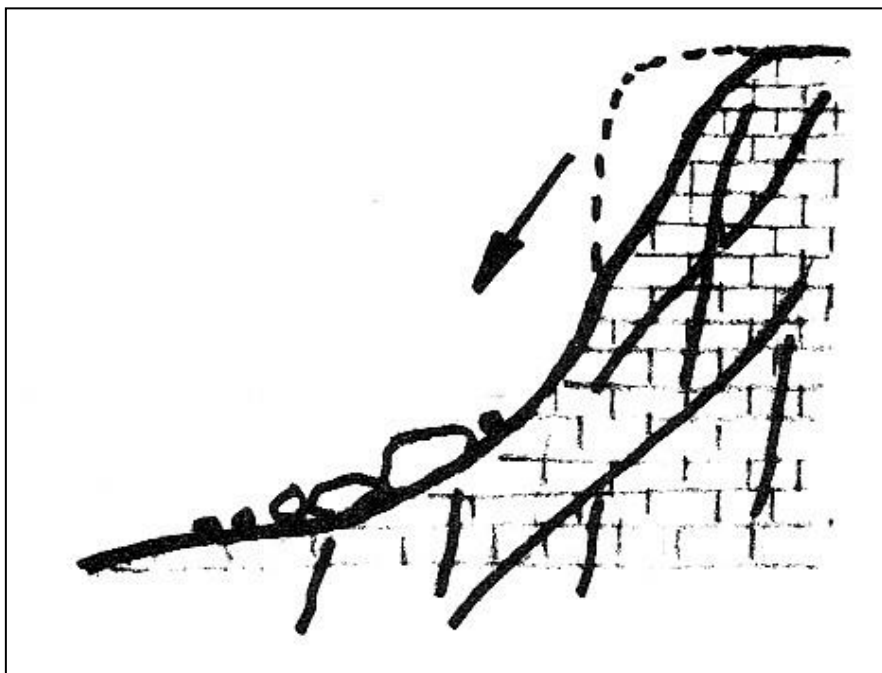
Les cavités peuvent être naturelles (vides de dissolution ou karsts) ou provenir d'anciennes carrières ou de bassins miniers.

On distingue les affaissements si le phénomène est lent et progressif, créant une dépression topographique continue et les effondrements brutaux qui sont limités en surface par des bords subverticaux qui délimitent le fontis. Les effondrements profonds peuvent se traduire, dans un premier temps par des affaissements de surface, puis évoluer vers des fontis.

### 3.2 Les écroulements

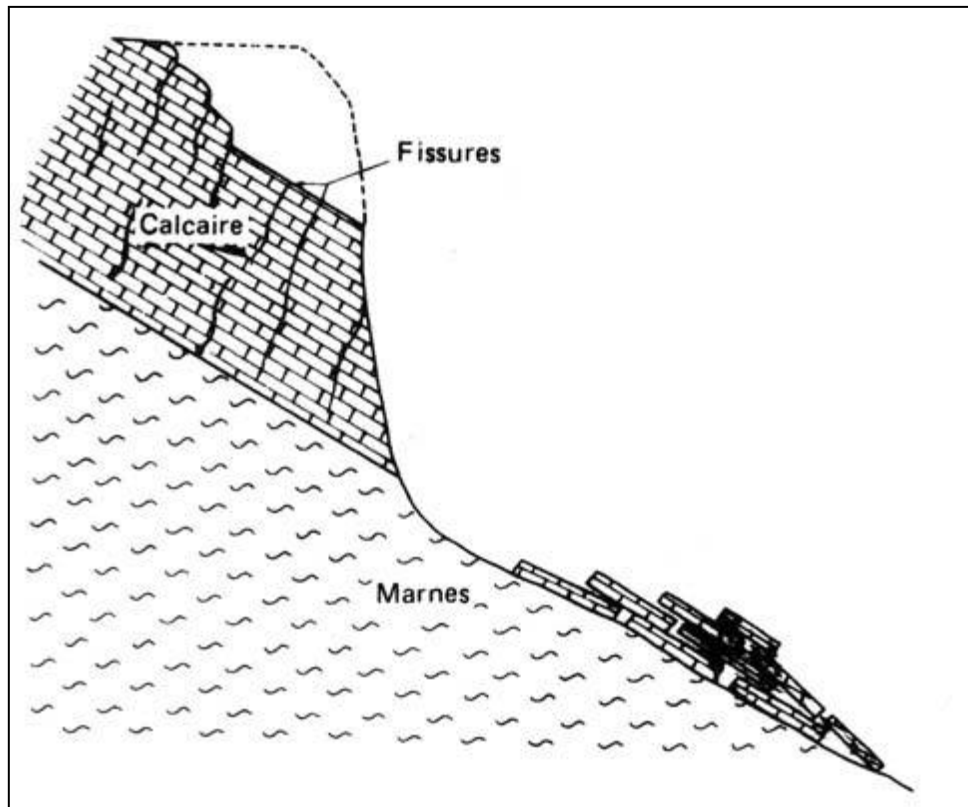
Les écroulements (éboulements en terrain rocheux) sont caractérisés par une chute soudaine de masses de terrain rocheux. Ils peuvent être dus à des causes internes au massif, l'écroulement typique est l'effondrement d'un pan de falaise.

- Dislocation d'une masse rocheuse diaclasée (Fig. 2) par altération interne ou accroissement de pressions interstitielles, par exemple.



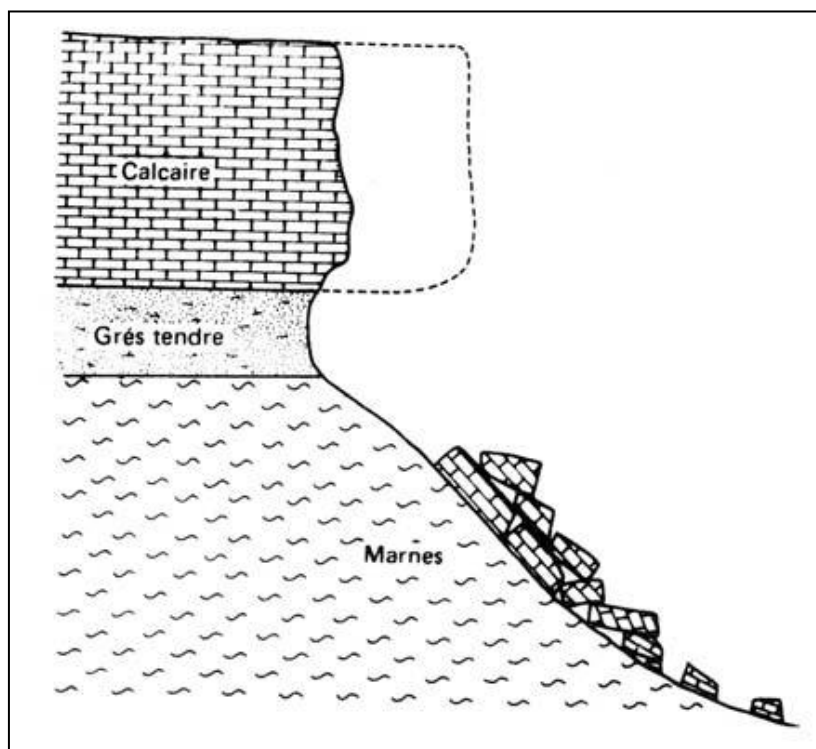
**Fig. 2 :** Écroulement rocheux par dislocation interne

- Glissements banc sur banc d'une masse rocheuse stratifiée (Fig. 3).



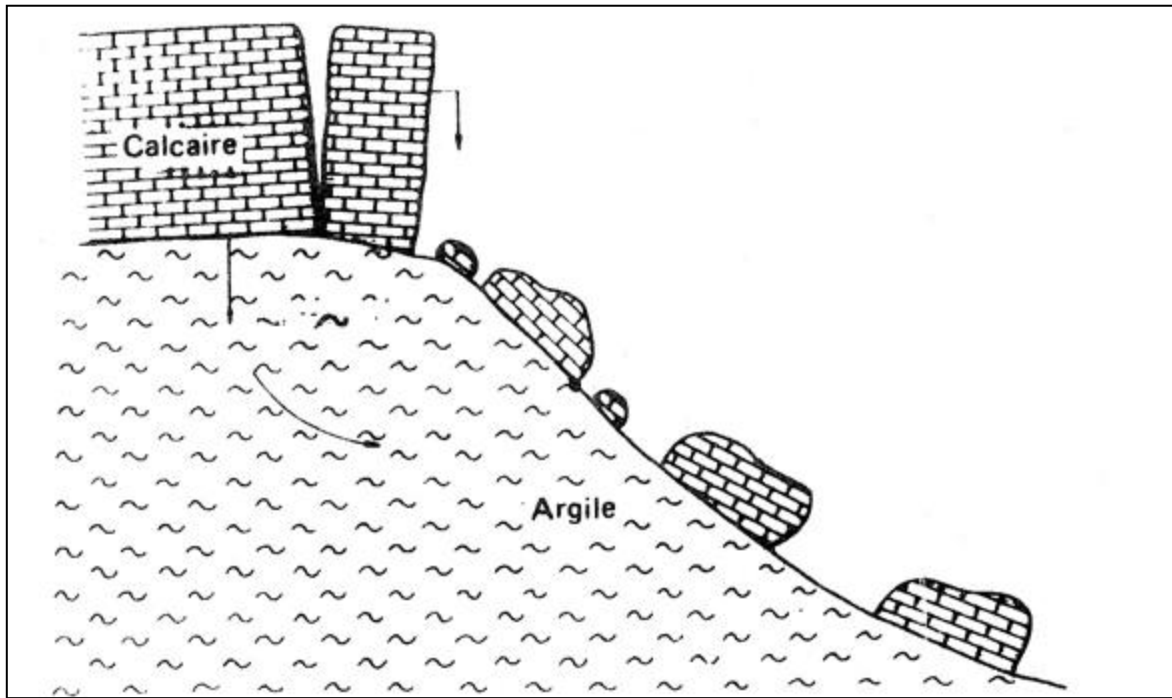
**Fig. 3 :** Écroulement par glissement banc sur banc

- Écroulements de masses mises en surplomb par érosion ou dislocation de couches tendres sous-jacentes (Fig. 4)



**Fig. 4 :** Écroulement de surplomb

➤ Écroulement par fluage ou glissement d'une couche sous-jacente (Fig. 5).



**Fig. 5 :** Écroulement par fluage d'une couche sous-jacente



**Photo 1:** Ecroulement des falaises d'El kantara

Pendant l'écroulement la vitesse est généralement considérable et l'extension importante. Il n'existe pas de méthodes de calcul simples, ni d'ouvrages de protection, mais les mesures de prévention, voir d'évacuation sont possibles.

### **3.3 Les glissements**

Ils affectent les matériaux meubles, de type sols, et sont généralement beaucoup plus lents que les écroulements (quelques heures). Ils concernent généralement une grande masse de terrain qui se détache et glisse sur la pente ou le talus. Ils surviennent à la suite d'un événement naturel – forte pluie, érosion de berge, dégradation des caractéristiques mécaniques, séisme, par exemple – ou sont la conséquence plus ou moins directe d'actions de l'homme, telles que travaux de terrassements (photo 2), déforestation, barrages et digues.

Selon la géométrie de la surface de glissement on distingue:

- le glissement plan, en milieux rocheux et en terrain meuble, s'effectue le long d'une surface de rupture sensiblement plane;
- le glissement rotationnel, en terrain meuble et en débris de roches très fragmentées, s'effectue suivant une surface plus ou moins circulaire, il se caractérise par un escarpement à l'amont et un bourrelet à l'aval, généralement on rencontrera plusieurs glissements emboîtés;
- glissement quelconque, est une combinaison des deux cas précédents.

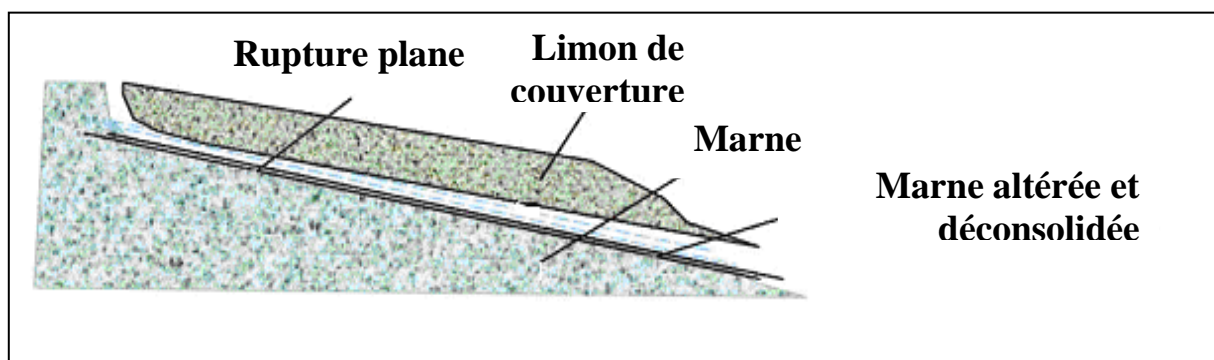




**Photo 2:** Glissement causé par les travaux de terrassement (Evitement de Jijel 2008)

### 3.3.1 Glissements plans

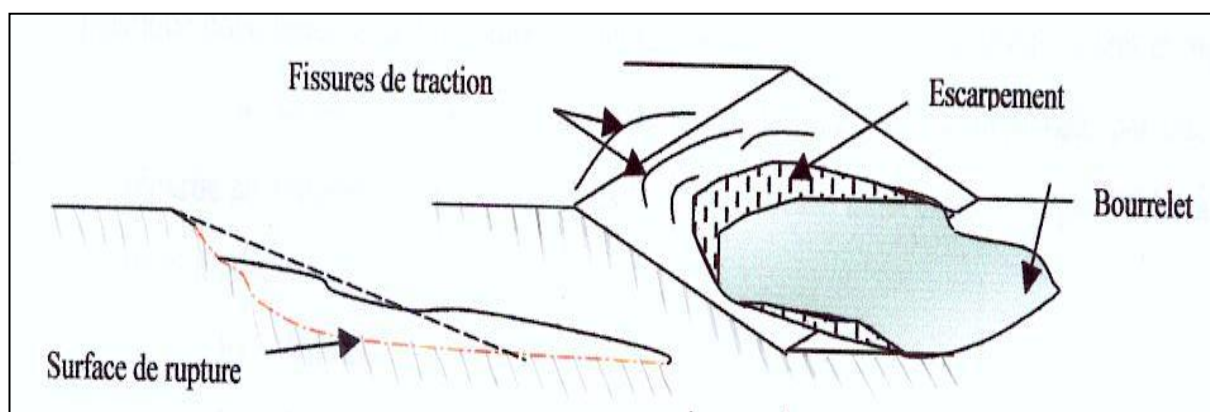
Ils se produisent lorsqu'existe une surface topographique pouvant guider une rupture plane (Figure 6). La surface de rupture suit une couche mince ayant de mauvaises caractéristiques mécaniques et souvent sujette à des écoulements (ex: cas d'une couche de couverture meuble perméable sur un substratum incliné).



**Figure 6.** Glissement plan.

### 3.3.2 Glissements rotationnels simples

C'est le type de glissement le plus fréquent. Ils sont caractérisés par un basculement de la masse glissée (Fig. 7), le long d'une "surface de rupture" dont la forme est parfois assimilable à un cylindre à directrice circulaire, c'est le cas en particulier des ruptures de remblais sur sols mous et de déblais en sols homogènes. La photo 3 montre un glissement survenu en 2009 sur la route nationale RN 29 de la wilaya de Bouverdes. Aussi la photo 4 visualise le glissement d'un talus en remblai survenu en 2006 lors des travaux de remblaiement de réparation d'une partie de la chaussée de la RN 79A de la wilaya de Mila.



**Figure 7.** Glissement rotationnel simple



**Photo 3:** Glissement au PK 68+800 de la RN 29 survenu en 2009

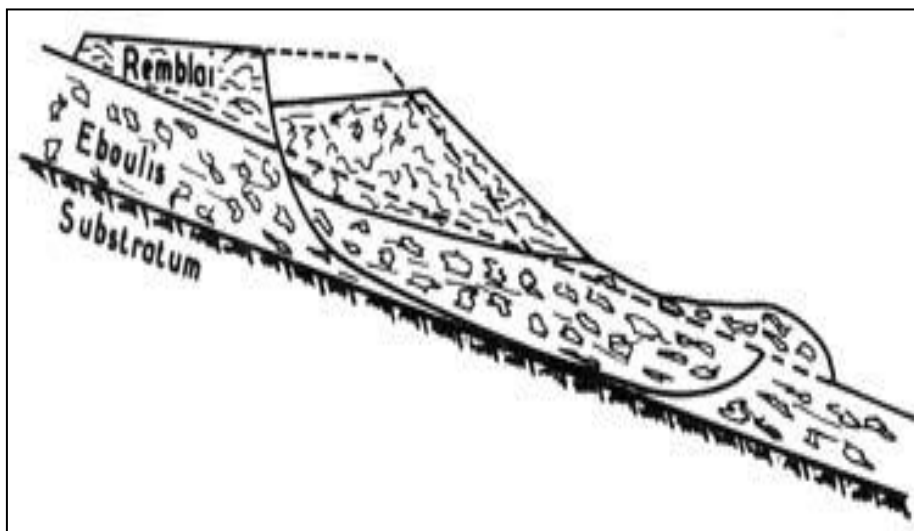


**Photo 4:** Glissement au PK 3+800 de la RN 79A survenu en 2006

### 3.3.3 Glissements rotationnels complexes

Lorsque le sol est hétérogène, ou anisotrope, il peut y avoir formation de glissements "complexes", dont certaines parties correspondent à des mouvements rotationnels et d'autres à des mouvements plans. C'est le cas, en particulier, des remblais sur versants (Fig. 8).

Combinaison de glissements plans et rotationnel = glissement complexe (cas le plus fréquent pour les versants naturels)



**Fig. 8 :** Glissement complexe d'un remblai sur versant

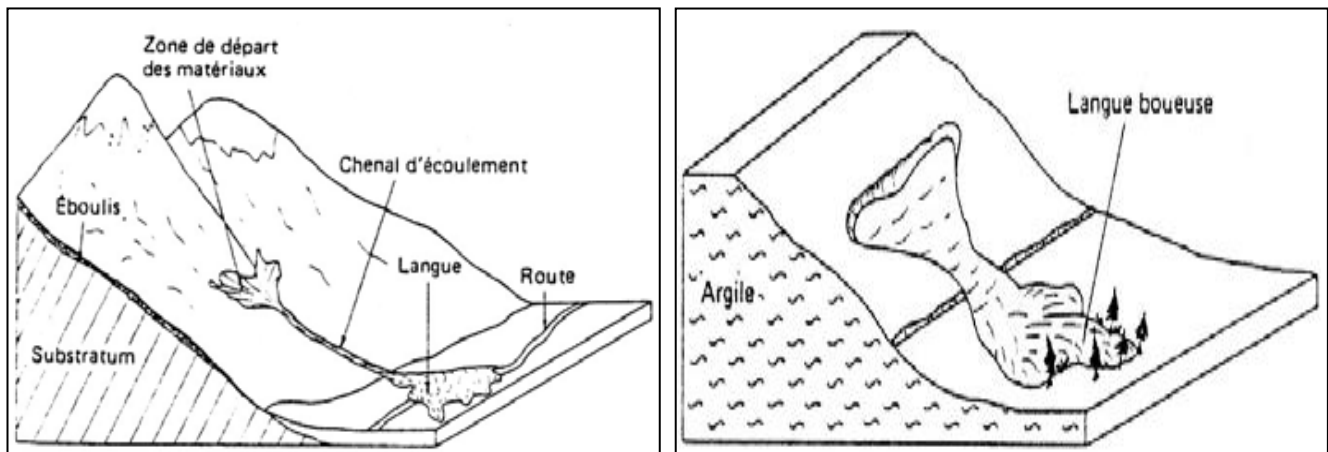
### 3.4 Coulées boueuses

Les coulées sont des mouvements dont le comportement mécanique est plus proche de celui de matériaux transportés par l'eau, que des glissements. Souvent ce sont les matériaux issus de glissements qui alimentent les coulées en présence d'une quantité importante d'eau (liée à la présence d'une rivière, d'un torrent ou à des précipitations importantes). Les coulées sont caractérisées par :

- des matériaux meubles, hétérogènes à matrice argileuse ;

- un déclenchement du phénomène lié au dépassement d'une teneur en eau critique qui rend le matériau semi fluide ;
- des distances de déplacement importantes et des vitesses qui peuvent être extrêmement élevées.

La photo 5 visualise la coulée argileuse survenue en 2005 sur la de RN 52 de la wilaya de Mila. La coulée boueuse survenue à Beb El-Oued en 2003 reste un événement terrible inoubliable causant la ruine de plusieurs maisons et faisant plusieurs victimes.



**Fig. 9** : Schémas type de coulées boueuses



**Photo 5:** Coulée argileuse survenue en 2005 sur la RN 52 de la wilaya de Mila

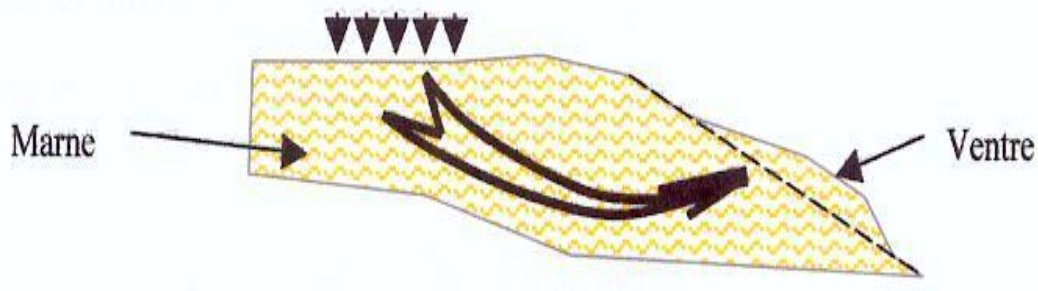
### **3.5 Mouvements de fluage**

Par opposition aux mouvements précédents, localisés dans le temps et caractérisés par une zone de rupture nettement définie, les mouvements de fluage constituent la manifestation externe des déformations du sol dans sa masse. Ce sont des mouvements lents, de faible amplitude, qui se développent dans une zone dont les contours sont généralement difficiles à définir, tant en extension qu'en profondeur. Ils concernent les sols argileux et se produisent superficiellement sans surface de glissement précise.

Le mouvement se produit généralement sans modification des efforts appliqués (contrairement aux glissements) : en fait le matériau est sollicité à un état proche de la rupture. Ce type de mouvement peut, soit se stabiliser, soit évoluer vers une rupture (Figure 10).

Les cas de fluage pur (déformation sans modification des sollicitations extérieures) sont très rares et très délicats à mettre en évidence. Par contre, de

nombreux glissements d'ouvrages sont précédés de mouvements lents de fluage dont l'évolution provoque la rupture. C'est le cas de certains remblais construits sur versants.

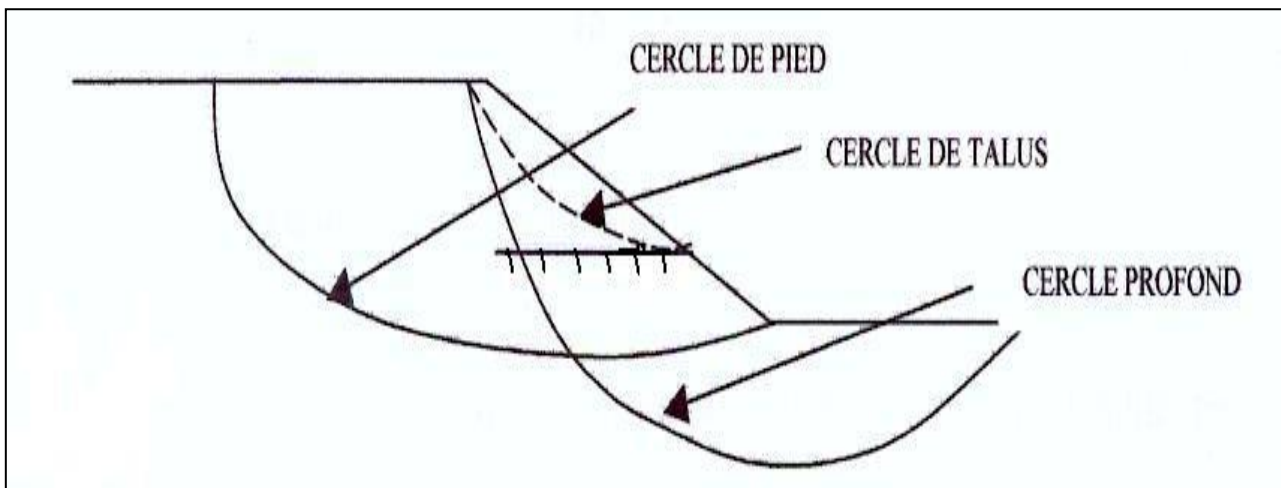


**Fig. 10 :** Exemple de fluage.

### **3.6 Talus en déblai et talus en remblai sur sols non compressibles**

D'une façon générale, les ruptures ont l'allure de glissements rotationnels circulaires parmi lesquels sont distingués (figure 11) :

- les cercles 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'ouvrages) ;
- les cercles profonds ne se produisent que dans le cas où le sol situé sous le niveau du pied du talus est de mauvaise qualité.



**Fig. 11** : Différents types de rupture circulaire.

### **3.7 Remblais sur sols compressibles (mous)**

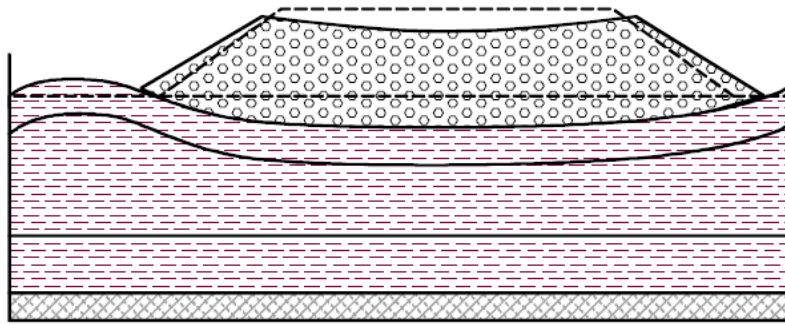
#### **3.7.1 Rupture générale par poinçonnement**

Le remblai s'affaisse sans subir de cisaillement. Il y a formation de deux bourrelets de part et d'autre du remblai au niveau du terrain naturel (schéma a de la Fig.12).

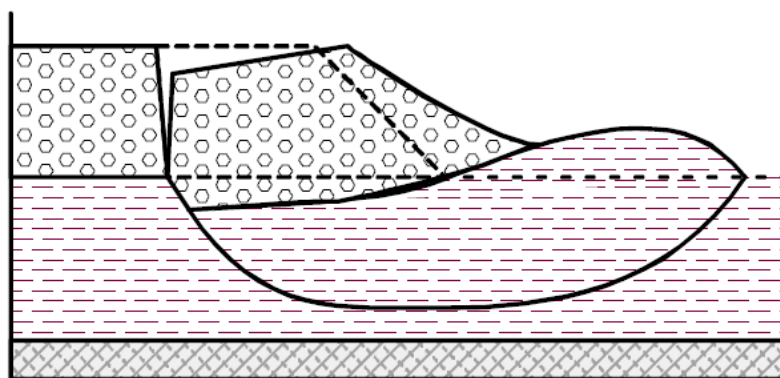
#### **3.7.2 Rupture locale rotationnelle**

Cette forme de glissement est la plus courante. La surface de rupture est circulaire avec basculement du remblai et bourrelet de pied (schémas b et c de la Fig. 12).

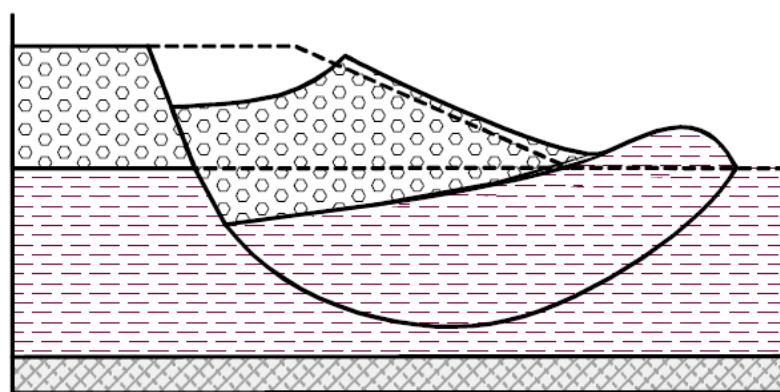




*(a) rupture par poinçonnement*



*(b) rupture rotationnelle*



*(c) Rupture rotationnelle*

**Fig. 12 :** Schématisation de la rupture d'un remblai sur sol mou

Pour ce type de construction, on peut citer le remblai routier sur la Sebkhia du Chott El Hodna. La photo 6 montre le remblai et les fortes déformations du sol support en période d'étiage. La construction de ce remblai a été possible en présence d'eau en surface (photo 7) grâce à l'utilisation des géotextiles de filtration et géogrille de renforcement visibles sur la photo



**Photo 6:** Remblai sur sol compressible: Remblai traversant la Sebkhia du Chott El Hodna



**Photo 7:** Jonction des deux bouses du remblai traversant la Sebkhia du Chott El Hodna

## 4 Caractéristiques mécaniques : résistance au cisaillement

L'étude mécanique des glissements suppose l'estimation de la résistance au cisaillement mobilisée le long d'une surface de rupture. La rupture en un point est caractérisée par de grandes déformations ; il n'y a plus d'équilibre possible si ces déformations ne sont pas contenues par ailleurs.

Le comportement au cisaillement d'un sol fin est différent selon que l'on laisse ou non le temps aux surpressions interstitielles de se dissiper lors du cisaillement : on est donc amené à distinguer la résistance à court terme (non drainée) et la résistance à long terme (drainée). La forte perméabilité des sols grenus permet un drainage quasi instantané : la distinction entre court terme et long terme est alors sans objet. Dans un calcul de type long terme, les contraintes à considérer sont les contraintes effectives ( $\sigma' = \sigma - u$ ), car ce sont celles qui gouvernent le comportement du squelette solide du sol. Dans un calcul à court terme, il est plus simple de raisonner en contraintes totales dans toutes les couches de sols fins.

L'enveloppe de rupture des sols dans le plan de Mohr ( $\sigma, \tau$ ) est en général assimilée à une droite d'ordonnée à l'origine  $c$  (cohésion) et de pente  $\tan \phi$  (frottement).

### 4.1 Sols grenus et sols fins

Les sols grenus, s'ils sont propres et secs, ont une cohésion nulle.

Pour les sols fins, deux types de caractéristiques sont couramment utilisées :

- caractéristiques drainées : cohésion effective  $c'$ , angle de frottement interne  $\phi'$  ;

- caractéristiques non drainées : cohésion non drainée  $c_u$  ainsi que  $\lambda = \Delta c_u / \Delta \sigma$  (coefficient d'accroissement de la résistance non drainée avec la contrainte de confinement). L'enveloppe de rupture en contraintes totales est une droite horizontale d'ordonnée à l'origine  $c_u$  et de pente  $\tan \phi_u = 0$ .

Des valeurs typiques de cohésion et de frottement sont présentées dans le tableau 1.

## 4.2 Résistance de pic, résistance résiduelle

L'existence d'un pic marqué sur les courbes d'évolution de la résistance en fonction de la déformation ou du déplacement dépend de l'état de compacité du sol au début du cisaillement: on l'observe dans les argiles surconsolidées et les sables denses. Après un grand déplacement, la résistance tend vers une valeur dite résiduelle, caractérisée par une cohésion quasi nulle et un angle de frottement affaibli, en raison de la réorientation des particules sur la surface de glissement (figure 13).

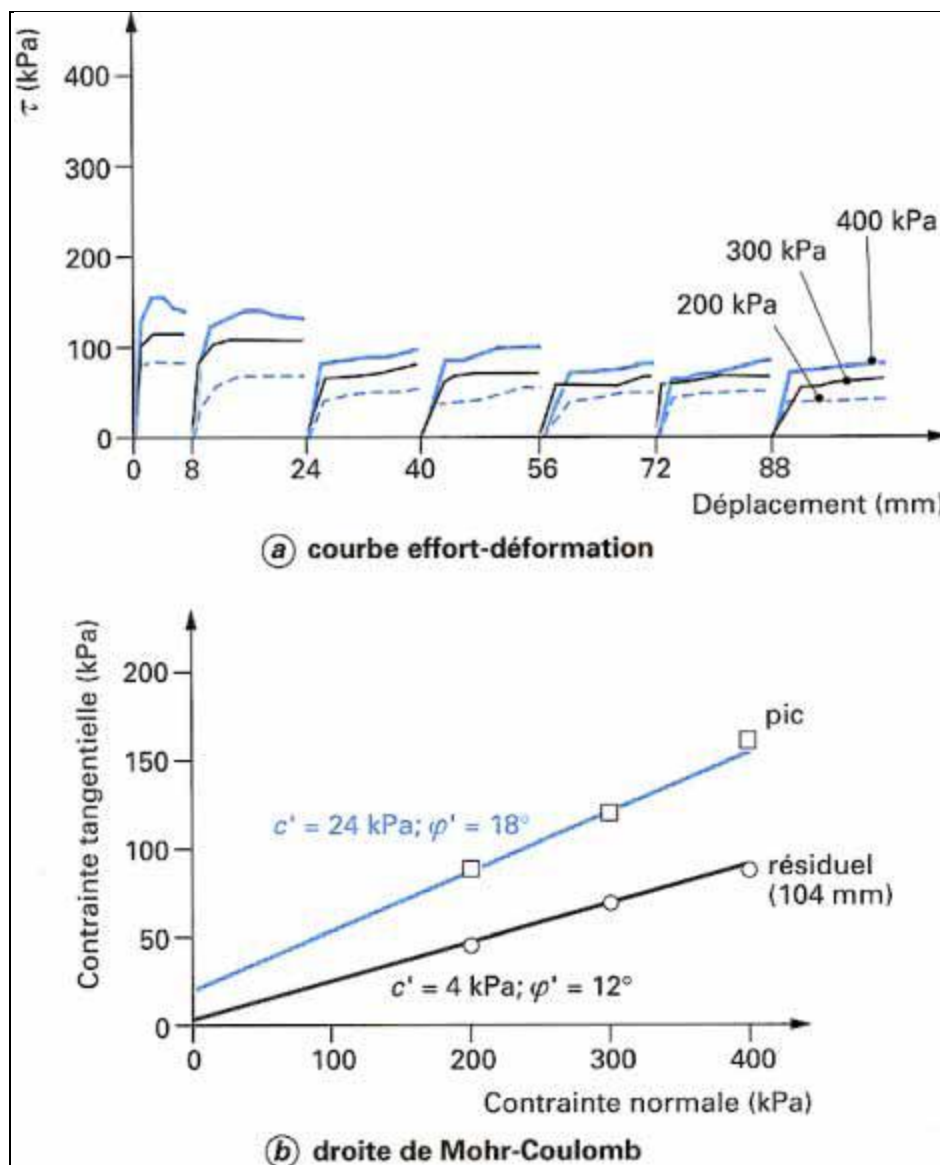
Les caractéristiques de résistance à utiliser sont donc différentes selon qu'il s'agit de glissements nouveaux (valeur de pic) ou de réactivations de glissements anciens (valeur résiduelle).

## 4.3 Évaluation de la résistance au cisaillement

On dispose de différentes méthodes pour évaluer la résistance au cisaillement en un site donné:

- mesure *in situ* (scissomètre) ou prélèvement d'échantillons pour essais en laboratoire (appareil triaxial, boîte de cisaillement) ;

- estimation par l'expérience ou par l'utilisation de relations empiriques reliant la résistance à d'autres caractéristiques géotechniques ;
- analyse à rebours : on détermine les caractéristiques par calage sur un glissement déclaré (qui est un essai de cisaillement en vraie grandeur) ; cela nécessite de faire des hypothèses sur le réseau hydraulique au moment de la rupture.



**Fig. 13** – Essai de résistance au cisaillement alterné à la boîte sur une argile

**Tableau 1 – Valeurs indicatives des caractéristiques mécaniques de quelques sols**

Type de sol	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'_{pic}$ (kPa)	$\varphi'_{pic}$ (degrés)	$c'_R$ (kPa)	$\varphi'_R$ (degrés)	$c_u$ (kPa)
Vase organique	13 à 15	0 à 10	25 à 32	0	25 à 30	14 à 18
Argile molle	15 à 19	0 à 10	28 à 34	0 à 5	10 à 15	< 25
Argile raide non fissurée	18 à 20	10 à 40	15 à 25	0 à 5	6 à 15	80 à 200
Limon	17 à 19	0 à 40	25 à 35	0	20 à 30	40 à 50
Sable	16 à 21	0	30 à 45 (1)	0	25 à 35	
Sables et graviers	16 à 22	0	35 à 48 (1)	0	30 à 35	

$\gamma$  poids volumique,  $c'$  cohésion effective,  $\varphi'$  angle de frottement interne.  
 (1) Valeurs correspondant à un matériau dans un état dense.

## 5 Méthodes de calcul de stabilité de pentes de sol

### 5.1 Le problème

Toute masse située près d'une surface libre en pente a tendance à se mettre en mouvement sous l'influence de son poids propre et des forces externes et internes : Il y a stabilité de la pente si cette tendance est équilibrée par des contraintes de cisaillement ; sinon il y a glissement.

En particulier, ces glissements de terrain peuvent intervenir à la suite de travaux qui peuvent modifier un équilibre préétabli :

- Talus naturels (déblais d'autoroute),
- Barrage en terre,
- Tranchées,
- Mur de quai,
- Remblais d'autoroutes ou canaux d'irrigation.

Le calcul de la stabilité des talus est destiné à prévenir les incidents dus à la modification du moment moteur ou à la modification du régime hydraulique, c'est à dire de trouver la pente à donner à un talus pour qu'il présente un certain degré de sécurité vis à vis du glissement.

### 5.2 Hypothèses de calcul

Il existe, en principe, deux possibilités pour calculer la stabilité d'une pente. La première est de considérer que la masse instable forme un bloc rigide, que le sol a un **comportement rigide-plastique** et donc qu'à la rupture tous les points de la masse instable atteignent en même temps leur seuil de rupture ; ce sont les méthodes de **calcul à la rupture**, les seules encore employées pratiquement à ce jour.

La seconde possibilité est d'appliquer la méthode des éléments finis en choisissant une loi de comportement réaliste ; en réduisant, par exemple, les caractéristiques de sol jusqu'à la rupture.

### 5.3 Définition du critère de rupture

Classiquement, l'analyse de stabilité d'un talus se fait par des "calculs à la rupture", dans un espace à deux dimensions. Le talus (Fig. 14) est supposé infiniment long et la surface de rupture potentielle ( $S$ ) est cylindrique. L'étude se fait pour une tranche de talus d'épaisseur unité.

Le calcul consiste à comparer les contraintes de cisaillement  $\tau$  s'exerçant le long de  $S$ , à la résistance au cisaillement  $\tau_{max}$  du sol dont on admet un comportement rigide-plastique. On admet également que la rupture se produit simultanément en tout point.

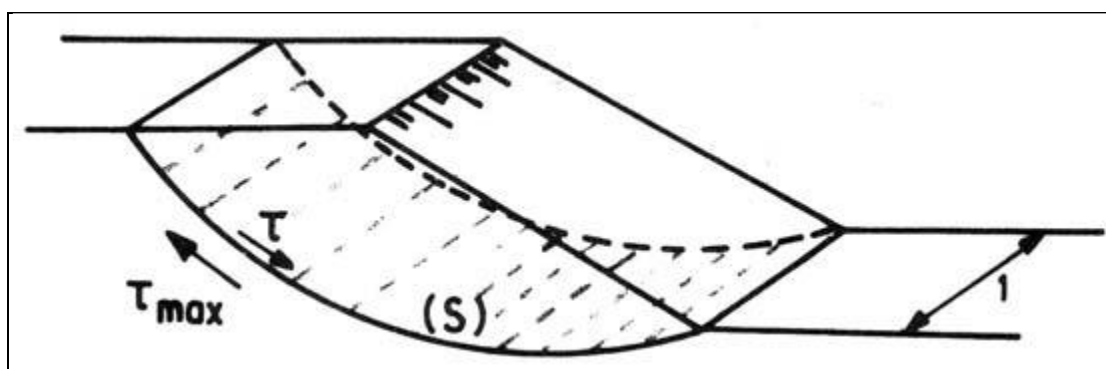


Fig. 14 : Schéma d'analyse de stabilité à la rupture

Le critère de rupture utilisé est le critère de COULOMB.

$$\tau \leq c' + \sigma' \tan \varphi'$$



Si l'on vérifie la stabilité de la pente par rapport à une première rupture éventuelle, on prendra :

$$\varphi'_{pic} , C'_{pic}$$

Si l'on vérifie la réactivation d'un glissement qui s'est déjà produit, on prendra:

$$\varphi'_{rés} , C'_{rés}$$

#### 5.4 Définition du coefficient de sécurité

Plusieurs définitions du coefficient de sécurité peuvent être adoptées ; actuellement, on utilise encore la définition suivante du *coefficient de sécurité global F* :

$$F = \frac{\tau_{max}}{\tau} = \frac{c' + \sigma' \tan \varphi'}{\tau}$$

$$\tau = \frac{\sigma' \tan \varphi'}{F} + \frac{c'}{F}$$

Cette définition conduit à étudier l'équilibre limite du sol avec des caractéristiques réduites :

$$\frac{\tan \varphi'}{F} \text{ et } \frac{c'}{F}$$

#### 5.5 Détermination de la géométrie de la rupture

Pour les pentes naturelles dont le glissement est amorcé, la surface de rupture est généralement connue, de même pour les glissements plans pour lesquels la surface de rupture a été reconnue.

Par contre, dans les autres cas, très nombreux, la surface de rupture est inconnue. Dans les cas courants, on adoptera une surface de glissement cylindrique à base circulaire et on recherchera le cercle qui donne le "coefficient de sécurité"  $F$  le plus faible, appelé coefficient de sécurité du talus.

## 5.5 Classification des méthodes

Il existe en réalité plusieurs dizaines de méthodes à la rupture. Elles présentent toutes des avantages et des inconvénients, tant théoriques que pratiques. Aucune n'est parfaite, dans la mesure où aucune ne tient compte de la déformabilité du sol. La confiance que l'on peut accorder à une méthode particulière est essentiellement fonction de l'expérience que l'on peut en avoir.

On peut classer ces méthodes schématiquement en deux groupes :

### a) Méthodes globales

Ces méthodes considèrent la totalité de la « masse libre » en faisant des hypothèses quant à la distribution des contraintes normales le long de la surface de rupture.

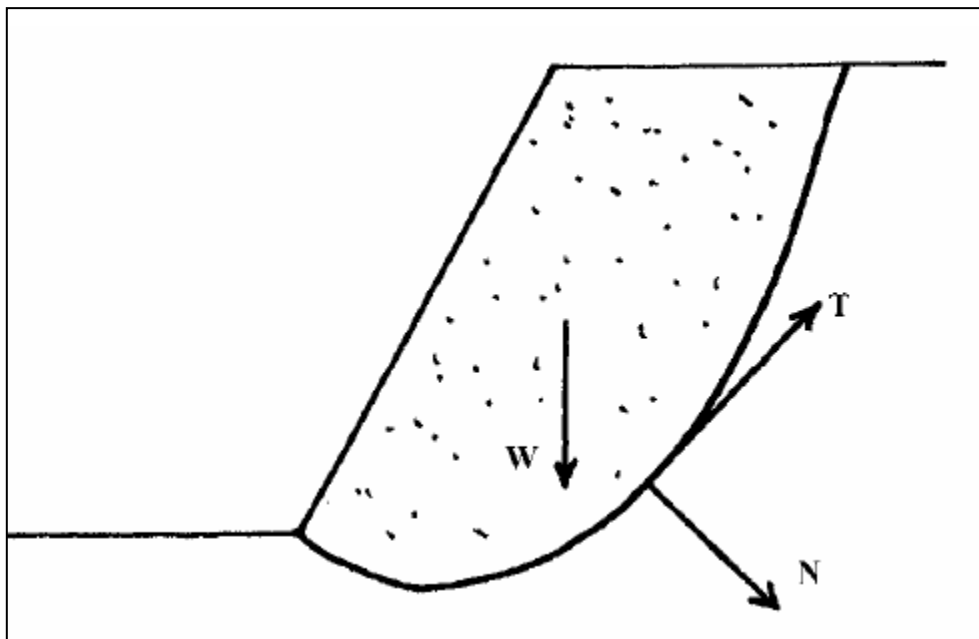
#### Exemple :

- Méthode de TAYLOR,
- Méthode de CAQUOT,
- Méthode de BIAREZ.

Ces méthodes sont utilisées seulement avec des surfaces de ruptures circulaires ou de simple ligne droite.

$\left\{ \begin{array}{c} N \\ T \end{array} \right\}$  Résultante des contraintes le long de la surface de rupture.

En particulier, dans le cas des talus homogènes, pour des surfaces de rupture circulaires, les méthodes globales de CAQUOT ou BIAREZ semblent intéressantes.



**Fig. 15** : Forces le long de la surface de rupture

### ***b) Les méthodes des tranches***

La masse libre est divisée en de nombreuses tranches verticales et l'équilibre de chaque tranche est considéré.

#### **Exemple :**

- **Méthode de FELLENIUS,**
- Méthode de BISHOP très utilisée en Grande Bretagne et Norvège,
- Méthode de MORGENSTERN et PRICE.

Ces méthodes considèrent l'équilibre d'une masse d'une manière approchée (division en tranches), et sont applicables seulement aux surfaces de rupture circulaire.

Les méthodes des tranches paraissent offrir la meilleure approche pour obtenir une solution précise pour n'importe quelle surface de rupture, que ce soit pour les sols stratifiés ou zonés

**Voir, pour les différentes méthodes de calcul de stabilité des talus, les fichiers suivants : chapitre 4 et chapitre 5 dans le dossier talus**







