

IV-1) Introduction

Chute des blocs rocheux constitue un risque majeur pour les agglomérations et les ouvrages en particulier les voies de communication tel que les routes et les chemins de fer. Les géotechniciens ont pour mission d'assurer la sécurité des personnes et des biens contre ces risques liés à ces éboulements rocheux, qui peuvent survenir sur les pentes naturelles ou artificielles. Les problèmes à résoudre sont très différents suivant le type d'ouvrage et les travaux à effectuer.

L'instabilité mécanique des masses de terrain en place peut être amorcée par divers causes naturels comme l'érosion, les tremblements de terre, ou les travaux de terrassements, et excavations. Dans les massifs rocheux, les réseaux de discontinuités représentent les zones de faiblesse et fragilisent de ce fait le massif.

IV-2) Mécanismes d'instabilités

L'équilibre d'un massif rocheux en pente, qu'il soit naturel ou anthropique, dépend des propriétés mécaniques et état de surface des joints les plus sollicités, en l'absence d'eau. A partir de là, l'altération et la dégradation du massif conduisent à une plus grande ouverture de certaines fractures. Les blocs rocheux se détachent et chutent dès que l'équilibre entre les forces de contact et gravité n'est plus assuré.

Les instabilités sont dues à une fragilisation d'ensemble avant mobilisation. La phase de mobilisation se caractérise par la constitution des poches de matériaux due à la dégradation sur place des roches. Elle commence par leur désagrégation (processus mécaniques) et/ou leur altération (processus chimiques).

Selon les versants, la forme du relief conduit à une décompression de ces masses rocheuses et à l'ouverture de leurs discontinuités. L'inclinaison des couches (le pendage) influe alors sur le détachement des blocs (*Fig. IV.1*). Ces déséquilibres vont donc favoriser l'écartement des diaclases et la création d'un nouveau réseau de fissuration (néo diaclases) indépendant du réseau initial et parallèle au versant.

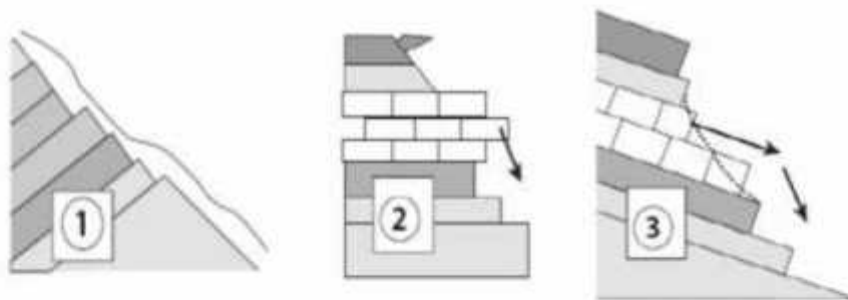


Fig. IV.1 : Influence du pendage sur le glissement.

IV-3) Typologie des mouvements de pente

L'existence d'une discontinuité peut entraîner une réduction de la résistance à la compression et aux cisaillements au niveau des joints. Donc le comportement des massifs rocheux traversés par des discontinuités va dépendre du nombre de familles des joints et leurs orientations par rapport aux directions des excavations.

Durant l'étude de stabilité des ouvrages en **MDR**, on suppose que le bloc est indéformable et que la déformation se localise au niveau des discontinuités, les principaux mouvements de ces blocs sont liés :

- A l'orientation des discontinuités par rapport à l'excavation;
- Les caractéristiques mécaniques des discontinuités en particulier à leur comportement à la rupture;
- Les mouvements possibles soit en translation (glissement, chute libre), en rotation ou d'une combinaison complexe d'une rotation et translation.

On observe diverses formes d'instabilités dans les pentes des massifs rocheux. Un glissement de terrain, est la conséquence d'un versant instable de montagne ou de colline qui se détache et glisse dans le sens de la pente. On distingue :

a. Les chutes de blocs qui proviennent de la dégradation d'une falaise ou d'un versant rocheux. Tous les mouvements de ce type (*jusqu'à quelques milliers de mètre cube*) ont en commun leur soudaineté et leur rapidité. Leurs trajectoires associent rebondissements, roulements, et glissement.

b. Les écoulements des massifs rocheux de grands volumes (*plus d'un million de m³*) qui sont plus complexes et qui peuvent se produire sur des décennies après l'apparition de crevasses profondes.

Les quatre modes de déplacement les plus fréquents sont rapidement décrits dans les paragraphes suivants.

1. Le glissement plan : Ce type d'instabilité correspond à un mouvement gravitaire de translation d'un pan de rocher sur une discontinuité plane du massif (fracture, discontinuité stratigraphique, banc sur banc), (Fig. IV.2). Les glissements sont généralement lents ou très lents, mais certains peuvent s'accélérer et devenir très rapides.

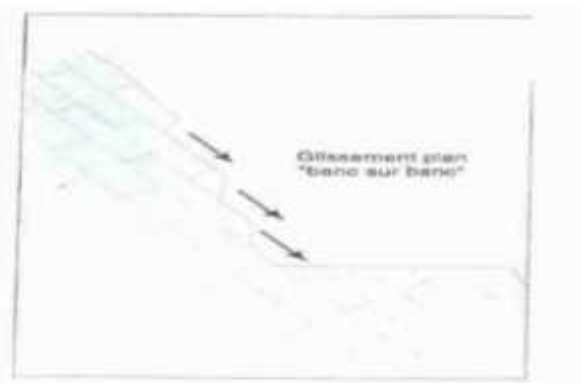


Fig. IV.2 : Glissement plan « banc sur banc ».

2. Le basculement affecte des bancs rocheux ou des pans de falaise qui fléchissent ou basculent vers l'aval (exemples: Fig. IV.3). Ce phénomène se produit lorsque le massif rocheux est découpé par des discontinuités très redressées et profondes, le structurant en grandes écailles ou colonnes. Ces colonnes présentent donc une géométrie très favorable au basculement.

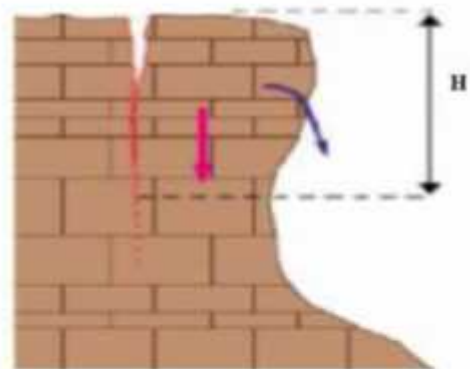


Fig. IV.3 : Décompression du massif et basculement.

3. Le Fauchage : La plupart des auteurs assimilent le fauchage au basculement. Cependant, selon d'autres auteurs, il s'agit d'un basculement, en direction de la vallée, d'un ensemble d'écaillés séparées par des discontinuités à fort pendage, s'amortissent avec la profondeur, (Fig. IV.4).



Fig. IV.4 : Fauchage

4. Rupture de surplomb, le massif rocheux devient instable lorsque les efforts de traction, de flexion et de cisaillement ne peuvent plus être compensés par la résistance du matériau. Une approche purement analytique peut être adoptée pour analyser les mécanismes de rupture. Rupture par traction et cisaillement d'une masse rocheuse en surplomb, (Fig. IV.5). Les chutes de blocs sont toujours des mouvements très rapides.

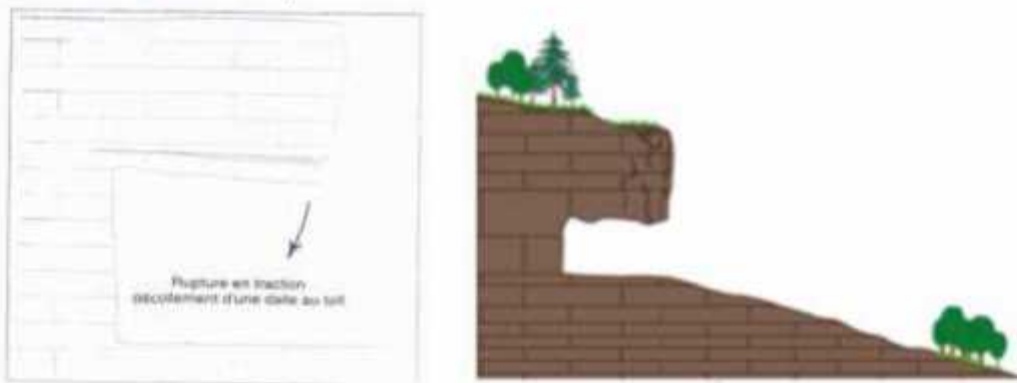


Fig. IV.5 : Rupture de surplomb.

Des mouvements plus complexes peuvent mettre en jeu simultanément plusieurs de ces mécanismes. Ceux-ci peuvent également se succéder dans le temps. Ainsi les chutes de blocs et les avalanches rocheuses sont généralement précédées par le glissement ou le basculement d'une masse rocheuse.

IV-4) Les paramètres d'instabilités

Les paramètres essentiels de déclenchement sont les suivants:

- *Infiltration ou résurgences d'eau* par la mise en pression d'eau dans les discontinuités en arrière des compartiments potentiellement instables ;
- *Mouvements dans les terrains meubles* sous la paroi rocheuse (fluage, glissement) entraînant un basculement par défaut d'assise ;
- *Glissements dans des terrains meubles* au-dessus ou en arrière de la paroi pouvant déstabiliser le massif rocheux (basculement en tête ou en pied);
- *Le vent* : lorsque des arbres sont enracinés en paroi, des vents violents peuvent provoquer des chutes de blocs, les racines écartant les compartiments rocheux;

- *Ravinement par ruissellement*: lorsque des passées meubles sont présentes, le ruissellement en paroi peut rapidement éroder la matrice fine et provoquer un déchaussement de blocs ;
- *Vibrations*: des séismes ou des vibrations liées à des travaux peuvent parfois suffire à provoquer des instabilités dans le massif;
- *Gel-Dégel* (dans les zones de haute altitude ou en climat froid) : les coins de glace peuvent repousser les compartiments rocheux, et lors du dégel les vides laissés après la fonte des coins de glace provoquent une déstructuration du massif neutralisant en grande partie la résistance au cisaillement des discontinuités.

IV-5) Les méthodes d'analyse de la stabilité des massifs rocheux

Les principaux ouvrages et travaux en Génie Civil impliquant la mécanique des roches MDR sont :

- ❖ La stabilité des talus et falaises naturel;
- ❖ Les fondations des barrages, les ponts et viaducs;
- ❖ Les travaux souterrains comme la construction des tunnels et les stations de stockage et les installations électriques et nucléaires;
- ❖ Les tassements des surfaces;
- ❖ Les carrières de concassage pour la production des enrochements, gravier et sable.

5.1. Définition du facteur de sécurité

Le calcul de la stabilité des talus est généralement estimé à l'aide d'un coefficient appelé coefficient de sécurité. Ce coefficient est défini comme étant le rapport du moment par rapport à un point fixe de la résultante des forces résistantes au glissement aux forces provoquant le glissement.

$$F_s = \frac{\Sigma \text{Moment des forces résistant du mouvement}}{\Sigma \text{Moments des forces provoquant le mouvement}}$$

En se référant aux valeurs du coefficient de sécurité on peut évaluer l'état de stabilité du talus comme le montre le tableau.

$F_s < 1$	talus instable,
$1 < F_s < 1,5$	Glissement possible.
$F_s > 1,5$	Généralement stable.

5.2. Méthodes d'analyse de la stabilité

Dans les massifs rocheux, une rupture structurale survient sur une ou des surfaces de rupture définies par les discontinuités préexistantes dans le massif rocheux. Habituellement, trois modes de rupture structurale sont considérés dans l'analyse de stabilité des pentes : le mode de rupture planaire), le mode de rupture de dièdre et le mode de rupture par basculement. La surface de rupture tend à être curvilinéaire et le mode de rupture peut se simplifier à la rupture circulaire.

IV-6) Etude de Stabilité des versants

6.1. Stabilité d'un dièdre

Dans un premier temps, face à un talus rocheux ou un toit de galerie, il convient d'identifier les mécanismes de rupture dits "*cinématiquement admissibles*". L'analyse mécanique, comparant efforts moteurs et efforts résistants est effectuée ensuite.

En supposant les blocs très résistants par rapport aux discontinuités — c'est très souvent le cas — et en éliminant la possibilité de basculement, on peut résumer la situation en disant qu'un bloc amovible est susceptible :

- de se détacher de toutes ses faces (chute directe en voûte de galerie par exemple) ;
- de glisser sur une de ses faces ;
- de glisser sur deux faces à la fois.

Le glissement sur plus de deux faces à la fois est très peu probable.

L'analyse stéréoscopique ou numérique des intersections de discontinuités permet de localiser rapidement les blocs susceptibles de bouger. On désigne par **dièdre** un bloc formé par la rencontre d'au moins deux discontinuités et d'une surface libre¹.

6.1.1. Etude cinématique pour deux familles de discontinuités

On considère un dièdre limité par deux plans de discontinuités P_1 et P_2 sur un versant dont le relief peut-être relativement compliqué. Le mécanisme de rupture est identique à un cas simple, de volume tétraédrique (Fig. IV.6).

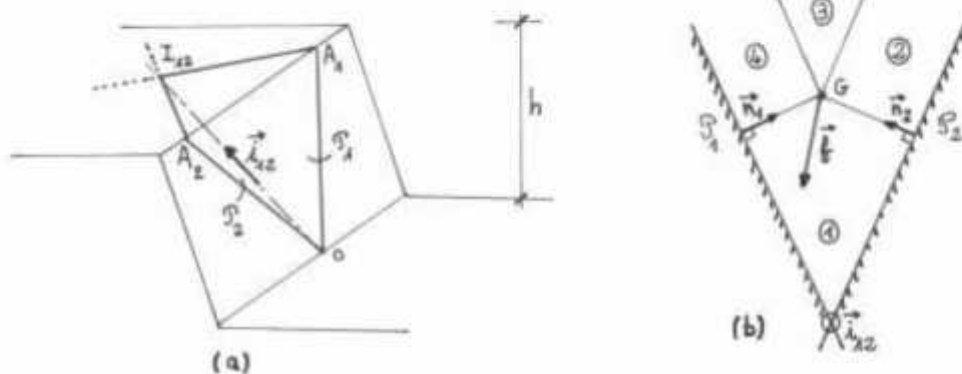


Fig. IV.6 : Dièdre formé par l'intersection de deux discontinuités :
(a) vue en perspective et (b) graphe d'instabilités

La Figure (IV.6-b) présente, dans un plan perpendiculaire à la droite OI_{12} intersection de P_1 et P_2 , les types d'instabilités d'un dièdre soumis à une force résultante F appliquée en G , en fonction de l'orientation de la projection f de F dans le plan de la figure :

- **Secteur 1** : glissement sur les deux faces à la fois, parallèlement à la droite OI_{12} (vecteur directeur I_{12}) ;
- **Secteur 2** : glissement sur la face P_2 seule ;
- **Secteur 3** : décollement des deux faces ;
- **Secteur 4** : glissement sur la face P_1 seule.

6.1.2. Etude mécanique

Supposons que l'étude cinématique a abouti à la conclusion d'un glissement potentiel sur les deux faces du dièdre, parallèlement à leur intersection. Chaque discontinuité est caractérisée par un critère de rupture de *Mohr-Coulomb* ($c_1, \varphi_1, c_2, \varphi_2$). La stabilité potentielle du bloc est définie de la manière suivante :

- Il existe des contraintes (σ_1, τ_1) le long de P_1 et (σ_2, τ_2) le long de P_2 telles que
- le dièdre est en équilibre sous l'ensemble des forces F et σ .
 - le critère de rupture n'est pas dépassé ($i = 1, 2$) :

$$\tau_i \leq c_i + \sigma_i \tan \varphi_i$$

Posons $N_i = \int \sigma_i ds_i$ et $T_i = \int \tau_i ds_i$ pour ($i = 1, 2$). Si on suppose que l'équilibre des moments est toujours vérifié, on peut réécrire la condition de stabilité potentielle ainsi:

Il existe $R_1(N_1, T_1)$, réaction sur le plan P_1 et $R_2(N_2, T_2)$, réaction sur le plan P_2 telles que pour $i = 1, 2$:

$$\begin{aligned} \vec{F} + \vec{R}_1 + \vec{R}_2 &= 0 \\ T_i &\leq c_i S_i + N_i \tan \varphi_i \end{aligned}$$

Si est l'aire de la face $Ol_{12}A_i$.

Considérons le trièdre de référence formé du vecteur l_{12} et des normales n_1 et n_2 aux plans P_1 et P_2 . En projetant on obtient $i = 1, 2$:

$$\begin{aligned} -\vec{F} &= F_{12}\vec{i}_{12} + F_1\vec{n}_1 + F_2\vec{n}_2 \\ \vec{R}_i &= T_i\vec{i}_{12} + N_i\vec{n}_i \end{aligned}$$

Ce qui implique alors :

$$\begin{aligned} F_{12} &= T_1 + T_2 \\ F_1 &= N_1 \\ F_2 &= N_2 \\ T_i &\leq c_i S_i + N_i \tan \varphi_i \end{aligned}$$

On obtient in fine la condition de stabilité potentielle :

$$F_{12} \leq c_1 S_1 + c_2 S_2 + F_1 \tan \varphi_1 + F_2 \tan \varphi_2$$

6.1.3. Coefficient de sécurité

On définit en pratique un coefficient de sécurité **FS**, établi de manière classique par le rapport "forces résistantes" sur "forces motrices" :

$$FS = \frac{c_1 S_1 + c_2 S_2 + F_1 \tan \varphi_1 + F_2 \tan \varphi_2}{F_{12}}$$

On vérifiera ensuite que le critère $FS > 1.3$.

6.2. Flambement et basculement de colonnes

6.2.1. Flambement

Pour des strates de terrains subverticales² très élancées en bord de falaise, il faut vérifier — comme en béton armé ou en construction métallique — que la condition de stabilité de forme est assurée. Pour ce faire, on se placera en 2D dans un plan orthogonal aux strates et on étudiera le flambement d'une colonne de roche d'un mètre d'épaisseur soumise :

- à son poids propre ;
- au frottement latéral avec les strates adjacentes.

On pourra incorporer également la perte de rigidité éventuelle due à la présence d'autres fractures. Les calculs sont ensuite similaires à ceux effectués classiquement en RDM.

6.2.2. Basculement

Considérons la colonne représentée sur la Figure (IV.7). Cette situation est fréquente le long d'une corniche rocheuse présentant des diaclases verticales et un niveau inférieur plus altérable ou plus gélif (calcaire sur marne par ex.).

La rupture par basculement est liée à la résistance de la section **AB**, la plus fragile de la colonne. Celle-ci est soumise à un effort normal F et un moment fléchissant $M = Fe$.

Dans l'hypothèse où l'excentrement est suffisant pour faire apparaître de la traction (résultante F en dehors du noyau central), les contraintes en **A** et **B** sont :

$$\sigma_A = \frac{F}{l} \left(1 + \frac{6e}{l} \right)$$

$$\sigma_B = \frac{F}{l} \left(1 - \frac{6e}{l} \right)$$

Il y a donc deux ruptures possibles : en traction en **B** et en compression en **A**. Pour évaluer un coefficient de sécurité, il faut être prudent sur les résistances à prendre en compte : résistances à long terme, vibrations de la colonne induisant une fatigue du matériau...

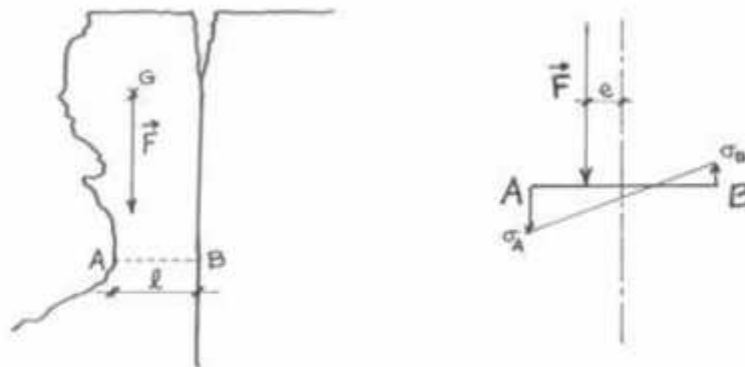


Fig. IV.7 : Basculement d'une colonne rocheuse.

6.3. Analyse de la stabilité d'un glissement plan

Il se produit dans les roches contenant des discontinuités planes, tels que les plans de stratifications suivant un plan au niveau d'une surface de discontinuité géologique (zone entre deux matériaux de nature différente, failles, joints de stratification,...etc.) (Fig. IV.8).. La ligne de rupture suit une couche mince de mauvaises caractéristiques mécaniques sur laquelle s'exerce souvent l'action de l'eau. Une telle couche est appelée « couche savon ».

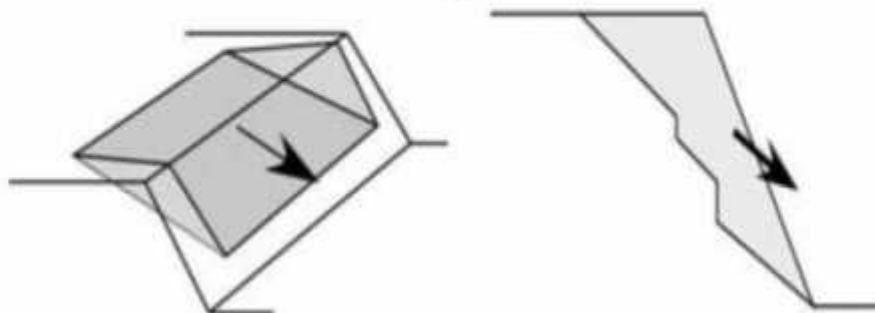


Fig. IV.8 : Glissement plans.

Ce type de défaillance peut se produire si une seule discontinuité est présente ou si une série de discontinuités forme un seul plan pour initier une défaillance dans une pente (Fig. IV.9). Cette défaillance peut être considérée comme un bloc de poids instable (W) inclinée d'un angle α par rapport à l'horizontale. La hauteur de la pente est H et l'angle de la pente est α . Le bloc glisse le long du plan de joint AC en raison de la gravité. Le facteur de sécurité (FS) est défini dans la méthode d'équilibre limite comme étant le rapport entre la résistance au cisaillement et la contrainte de cisaillement.

➤ **Cas absence d'eau dans la discontinuité**

Ainsi Le facteur de Sécurité:

$$F_s = \frac{\text{contrainte de cisaillement mobilisée}}{\text{contrainte de cisaillement nécessaire}} = \frac{\tau_{mo}}{\tau_{néce}}$$

$$F_s = \frac{c + \sigma \tan \varphi}{\tau_{néce}}$$

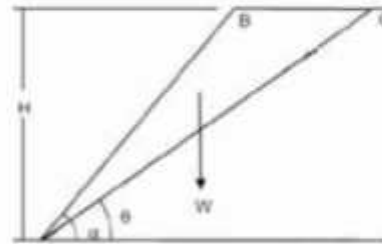


Fig. IV.9 : Géométrie d'une pente en rupture plane.

Longueur des discontinuités :

$$AC = \frac{H}{\sin \theta}$$

Surface de rupture : $AC \times 1m^2$ $AC = 1m^2$ (L'épaisseur de la pente est égale à l'unité)

Poids du bloc instable : $W = \frac{\gamma H^2}{2} (\cot \theta - \cot \alpha)$

La contrainte normale : $\sigma = \frac{W \cos \theta}{A}$

La contrainte de cisaillement: $\tau = \frac{W \sin \theta}{A}$

Avec :

- τ : contrainte de cisaillement ;
- c : Force de cohésion de la surface de rupture ;
- φ : Angle de frottement de la surface de rupture ;
- γ : le poids volumique de la roche ;

$$F_s = \frac{c + \frac{W \cos \theta}{A} \tan \varphi}{\frac{W \sin \theta}{A}} = \frac{cA + W \cos \theta \tan \varphi}{W \sin \theta}$$

➤ **Cas présence d'eau dans la discontinuité**

Lorsque l'eau remplit la discontinuité, elle exerce une pression qui réduit la contrainte normale sur la discontinuité (Fig. IV.10).

La contrainte normale effective due à la présence d'eau dans le joint, est donnée en tant que :

- u : pression de l'eau ;
- σ' : contrainte normale effective ;
- σ : contrainte normale ;
- ρ : poids volumique de l'eau ;
- H : hauteur de la colonne d'eau

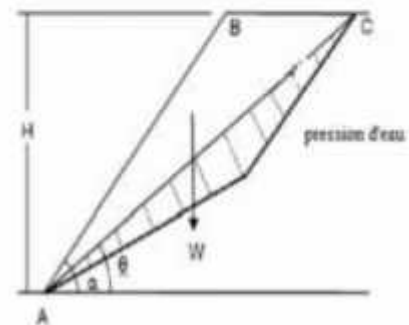


Fig. IV.10 : Géométrie d'une pente en rupture plane saturée d'eau.

IV-7) Méthode de confortement des massifs rocheux instables

Ce sont des ouvrages de protection construits ou creusés qui s'opposent à la propagation des éboulis. Parfois, ces ouvrages sont combinés ensemble pour une plus grande efficacité.

7.1. Merlons et digues

Ce sont des ouvrages massifs en remblais surélevés, situés entre la pente instable et la zone à protéger. L'implantation d'une digue au sens large suppose que l'on dispose physiquement d'une emprise suffisante entre l'objet à protéger et le pied du versant.

Les merlons sont érigés lorsque l'on souhaite protéger un secteur menacé par des instabilités présentant des volumes élevés. Ce sont des protections collectives, qui peuvent également être mises en œuvre contre les avalanches de neige.

7.2. Les fosses de réception

Il s'agit d'ouvrages obtenus par déblais sur la trajectoire des éboulis en amont de l'objectif à protéger. Plusieurs conceptions peuvent être imaginées, allant d'une configuration d'une fosse élargie, destinée à piéger les blocs se détachant des petits talus situés en bordure de route, à un ouvrage large et profond, creusé dans le terrain pour contenir de plus gros blocs et des volumes plus importants d'éboulis.

7.3. Les écrans rigides

Les écrans à structure légère ont une capacité inférieure à 100 kJ, alors que ceux en gabions ont une capacité de l'ordre du MJ.

7.4. Les barrières fixes

L'objectif des barrières fixes est de guider les instabilités en mouvement et de dissiper de l'énergie par frottement. Ce type de grillage passif a une capacité de rétention de quelques dizaines de kJ. Les filets atteignent quelques centaines de kJ, (Fig. IV.20).

7.5. Purgé et Reprofilage

7.5.1. La purge

Cette opération consiste à détacher les éléments instables à l'aide d'une barre à mine ou de petites charges d'explosifs. Il s'agit soit de charges appliquées, soit de charges forées.

7.5.2. Le reprofilage

Il s'agit de l'adoucissement de la pente du talus, par purge, décapage ou dérochage, dans le but de prévenir la chute de blocs instables. La pente artificielle devrait donc être inférieure au pendage aval naturel du massif rocheux, (Fig. IV.11).

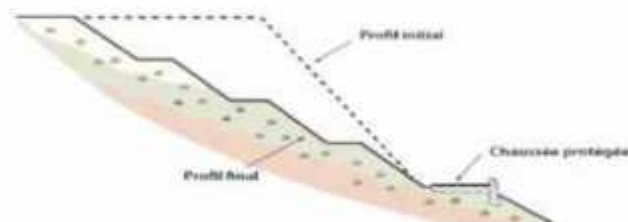


Fig. IV.11 : Reprofilage de la pente naturelle d'un massif instable.

7.6. Systèmes de confortement complémentaires

D'autres techniques de soutènements peuvent être associées aux solutions de traitement global classique, comme la pose de filets ou grillages actifs, le béton projeté, le boulonnage, les ancrages, etc. (Fig. IV.12).

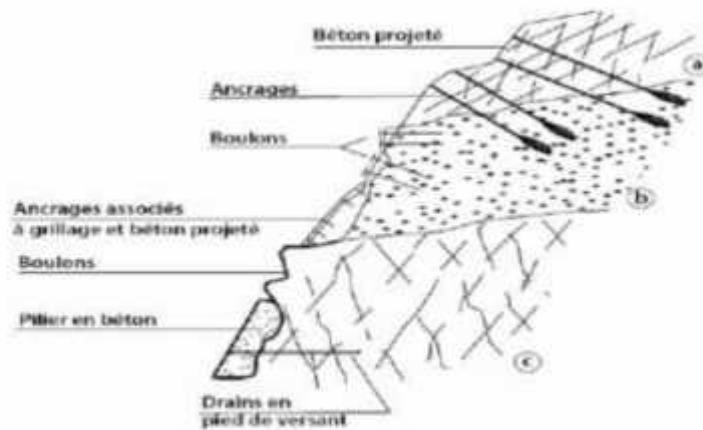


Fig. IV.12 : Types d'interventions de confortement.

7.7. Les grillages et filets plaqués

Les treillis et filets plaqués, utilisés en parades actives peuvent être métalliques ou en PVC. Ce sont des nattes de filets ou de grillages fixées contre la paroi, permettant la stabilité superficielle ou locale du massif.

Le placage des nattes de grillages ou de filets contre la paroi vise à prévenir et enrayer rapidement tout mouvement consécutif à une rupture. Il est effectué à l'aide de câbles et d'ancrages répartis sur le pourtour de la zone instable, (Fig. IV.13).

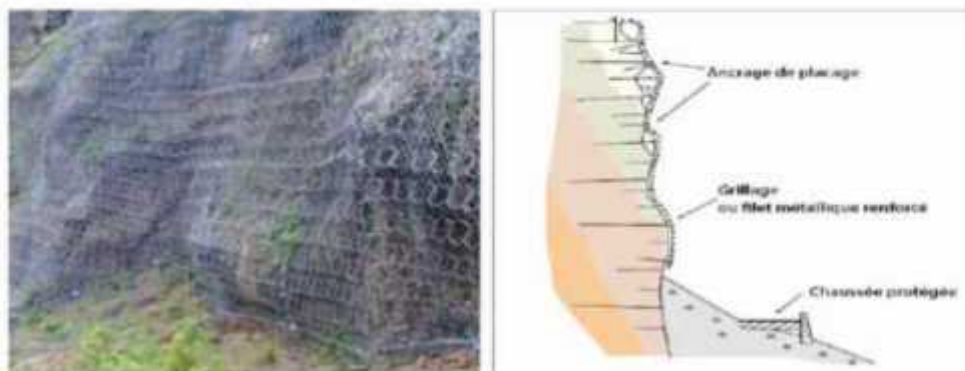


Fig. IV.13 : Stabilisation de paroi par plaquage de filets de grillage.

7.8. Le boisement de protection

Le boisement peut être un moyen de protection contre les éboulements de pentes. La forêt peut en effet maîtriser partiellement ou totalement les conséquences des divers aléas en retenant des blocs en mouvement, en luttant contre l'érosion et les glissements superficiels.

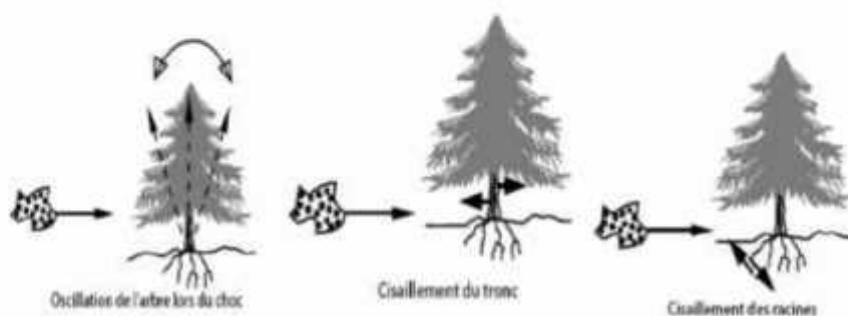


Fig. IV.14 : Modes de dissipation de l'énergie d'un bloc par un arbre.