

Ingénierie des pentes rocheuses naturelles et artificielles

D. Hantz - Lirigm / ISTG, Université Joseph Fourier, Grenoble

1. INTRODUCTION

L'ingénierie des pentes rocheuses a pour but de protéger les personnes et les biens contre les risques liés aux mouvements rocheux, qui peuvent survenir sur les pentes naturelles ou artificielles. Les problèmes à résoudre sont très différents suivant le type d'étude effectuée. Dans cet article, nous distinguerons trois grands types d'étude : les études de dimensionnement, l'évaluation des pentes instables et l'évaluation des pentes existantes.

Les études de dimensionnement concernent les pentes de futures excavations (carrières, aménagements) ou des pentes existantes qui doivent être modifiées (par exemple, renforcées). Ces pentes doivent être dimensionnées de manière à garantir leur stabilité pendant une période donnée, avec un certain risque d'erreur, qui dépend des conséquences d'une éventuelle rupture. Il sera différent entre un talus d'exploitation minière et un déblai autoroutier.

Les pentes instables présentent des indices de mouvement actuel ou récent, tels que des fissures ouvertes ou des chutes de blocs. Si elles menacent des personnes ou des biens, elles doivent faire l'objet d'un diagnostic sur leur évolution future.

Les pentes stables existantes, ne présentant aucun indice de mouvement récent, peuvent être l'objet d'une évaluation en cas de doute sur leur évolution future. C'est le cas, notamment, des versants étudiés dans le cadre des plans de prévention des risques naturels.

Après une description des phénomènes pouvant affecter les pentes rocheuses, cet article a pour but de présenter les différentes approches utilisées dans ces contextes variés et de montrer leurs limites.

2. MOUVEMENTS DE TERRAINS AFFECTANT LES PENTES ROCHEUSES

2.1. Rupture et déformation des massifs rocheux

En mécanique, une rupture correspond à l'apparition

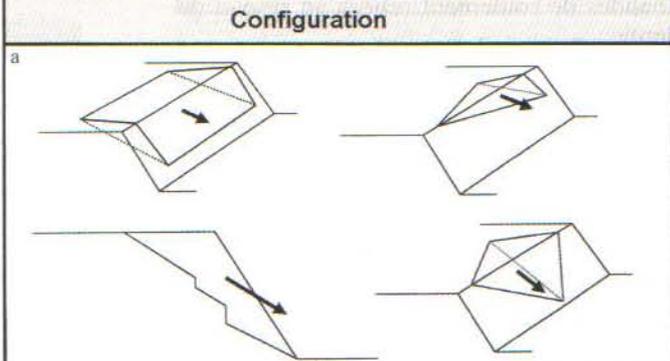
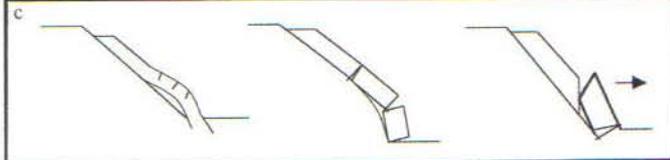
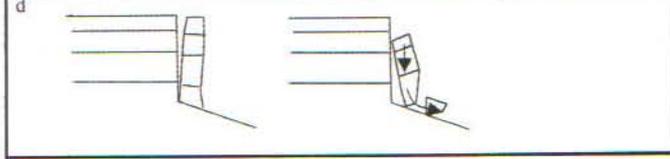
Configuration		
a		glissements translationnels (sur 1 plan, sur une famille de plans ou sur deux plans)
b		glissements rotationnel et composé
c		rupture de banc
d		rupture de colonne en pied
e		basculement de colonne ou de blocs
f		rupture de surplomb

Figure 1 - Configurations favorables aux éboulements et mécanismes de rupture

d'une discontinuité de déplacement sur une surface, par glissement ou par ouverture de celle-ci. Lors d'un essai de compression d'un échantillon rocheux, des ruptures se produisent à l'intérieur de celui-ci (microruptures) avant qu'une surface de rupture ne le sépare en deux parties (rupture de l'échantillon). En ingénierie, on parle de **rupture d'une pente** lorsqu'une masse rocheuse, de taille non négligeable devant celle de la pente, se déplace par rapport au reste du massif. Ce déplacement peut être lent ou rapide. La surface de rupture peut emprunter des discontinuités préexistantes ou, au contraire, résulter d'une rupture de la matrice rocheuse (dans le cas de roches de faible résistance). Les principaux mécanismes de rupture sont représentés sur la figure 1. Si des ruptures se produisent dans une pente, sans découper une masse distincte (ruptures locales ou contenues), on considère qu'elles participent à la **déformation** de la pente.

2.2. Origine des pentes

On peut distinguer deux types de pentes (Duffaut, 1994) : celles résultant d'un processus d'excavation ou d'érosion (pentes excavées) et celles résultant de l'accumulation de matériaux (pentes construites). Cet article concerne essentiellement les pentes excavées, qu'elles soient naturelles ou artificielles. Toute excavation dans la croûte terrestre provoque une **décompression** de celle-ci, qui se traduit nécessairement par une déformation du massif et éventuellement par une rupture. En travaux souterrains, cette déformation est appelée convergence et la rupture se traduit par un éboulement ou une "décompression brutale". Dans le cas des excavations de surface, le terme d'**expansion** semble plus approprié, car il n'y a pas toujours deux versants opposés qui convergent. Certains auteurs utilisent le terme de rebond. Pour les pentes naturelles, la vitesse d'excavation est tellement lente à l'échelle humaine, que l'expansion est généralement imperceptible. Les pentes artificielles, au contraire, sont excavées suffisamment vite pour qu'elle soit mesurable.

Lors de l'excavation d'une fosse plus ou moins symétrique, l'expansion se traduit par un soulèvement du fond de fosse et par un rapprochement des crêtes de talus (convergence). Le soulèvement est rarement mesuré, car il faut un forage pour avoir la position initiale des points en fond de fosse. Il a été mesuré dans les mines à ciel ouvert de lignite, en Allemagne, en utilisant des forages réalisés pour le rabattement de la nappe aquifère avant l'exploitation. Le déplacement horizontal en crête est mesuré plus facilement. A titre d'exemple, le déplacement horizontal provoqué par l'excavation, dans des terrains carbonifères, d'une carrière d'une centaine de mètres de profondeur avec des pentes d'environ 45° est de quelques cm.

2.3. Typologie des mouvements de pente

Le terme mouvement de terrain est utilisé à la fois pour désigner les phénomènes liés à la présence de vides souterrains (affaissements et effondrements) et ceux liés à la pente de la surface du sol. Ces derniers peuvent être désignés sous le terme général de mouvement de versant, mouvement de pente ou glissement de terrain au sens large (bien que les glissements ne représentent qu'un type particulier de mouvement). Ils sont généralement classés en fonction du mode de déplacement et du type de matériau (UNESCO, 1990; Cruden et Varnes, 1996; PPR, 1999; CFGI, 2000).

Mais du point de vue de la sécurité, la caractéristique la plus importante d'un mouvement de versant est sa vitesse. Les mouvements très rapides (du km/h à plusieurs dizaines de km/h) menacent directement les personnes, car l'évacuation est impossible. Les mouvements rapides (quelques m/h à quelques hm/h) provoquent la destruction des bâtiments situés sur la masse en mouvement ou sur sa trajectoire, mais permettent l'évacuation des personnes. Les mouvements extrêmement lents (vitesse inférieure ou égale à quelques cm/an) permettent des constructions moyennant certaines précautions. Dans les régions montagneuses, de nombreuses habitations subissent, sans trop de dégâts, des déplacements de plusieurs cm par an. Les quatre modes de déplacement les plus fréquents sont rapidement décrits dans les paragraphes suivants.

Le **glissement** se caractérise par l'existence d'une surface de glissement délimitant une masse en mouvement (figures 1a et 1b). Cette surface peut être préexistante dans le massif (fractures dans un massif rocheux) ou se développer à la suite, par exemple, d'une excavation dans un terrain peu résistant. Les glissements sont généralement lents ou très lents, mais certains peuvent s'accélérer et devenir très rapides.

Le **basculement** affecte des bancs rocheux ou des pans de falaise qui fléchissent ou basculent vers l'aval (exemples: figure 1e). Ce phénomène peut être très rapide (pan de falaise déversé qui s'écroule) ou très lent (flexion de couches dans un versant, appelée aussi fauchage).

La **chute** concerne essentiellement des blocs rocheux, qui peuvent tomber en chute libre, rebondir et rouler (figure 1f). Les chutes de blocs sont toujours des mouvements très rapides.

L'écoulement est un mode de déplacement qui s'apparente à celui d'un fluide. Il recouvre des phénomènes très différents: avalanche rocheuse (mouvement très rapide, dans lequel les blocs, en grand nombre, s'écoulent comme du sable); coulée boueuse (mélange de terre et d'eau, pouvant atteindre des vitesses très rapides); déformation d'un versant, lente et continue (sans surface de rupture).

Des mouvements plus complexes peuvent mettre en jeu simultanément plusieurs de ces mécanismes (figure 1c par exemple). Ceux-ci peuvent également se succéder dans le

temps. Ainsi les chutes de blocs et les avalanches rocheuses (que nous regroupons sous le terme d'**éboulement**) sont généralement précédées par le glissement ou le basculement d'une masse rocheuse.

3. DIMENSIONNEMENT DE PENTES FUTURES OU MODIFIÉES

Deux approches peuvent être distinguées pour le dimensionnement de nouvelles pentes: la plus ancienne, empirique, s'appuie sur l'expérience acquise dans le même type de terrain; la plus récente, mécanique, est basée sur une représentation simplifiée du terrain (le **modèle**), qui permet une analyse mécanique de la stabilité. Ces deux approches, qui sont aujourd'hui complémentaires, nécessitent toutes deux une reconnaissance géologique et géomécanique du terrain.

3.1. Approche empirique

Dans le passé, de nombreuses pentes ont été dimensionnées sans calculs mécaniques, à partir de l'expérience des ingénieurs. En analysant un grand nombre de pentes, stables et instables, certains auteurs ont tenté de formaliser cette expérience et ont proposé des méthodes de dimensionnement ou d'évaluation, basées sur une classification géomécanique des massifs rocheux. La méthode la plus connue (Romana, 1993, 1995) est basée sur un indice d'évaluation de la stabilité, appelé SMR (Slope Mass Rating). Il est obtenu en calculant d'abord un premier indice, le RMR (Rock Mass Rating), qui permet d'évaluer la qualité intrinsèque du massif rocheux, puis en apportant une correction à celui-ci, qui dépend de la disposition de la pente par rapport à la structure du massif et du mode d'excavation. Le RMR fait intervenir la résistance de la matrice rocheuse, l'espacement des discontinuités, les conditions des discontinuités (rugosité, continuité, ouverture, remplissage) et les conditions hydrauliques. La correction dépend des différences de pendage et d'azimut entre la pente et les discontinuités, du pendage des discontinuités et de la technique d'abattage (pré-découpage, tir amorti, ...).

L'approche empirique seule ne peut être utilisée qu'au niveau d'un pré-dimensionnement ou comme point de départ d'une étude mécanique.

3.2. Approche mécanique

L'approche mécanique du dimensionnement des pentes rocheuses est décrite dans de nombreux ouvrages généraux de géotechnique (CFMR, 2000), dans quelques ouvrages spécialisés en ingénierie des pentes (Hoek et Bray, 1981) et dans de nombreux articles, dont certains concernent spécifiquement les talus de mines à ciel ouvert

(Hantz, 1987; Wojtkowiack, 1988; Cojean, 1998). Nous ne reviendrons pas sur les différentes méthodes utilisées, mais nous insisterons sur l'incertitude inhérente à ce type d'études et, dans le paragraphe suivant, sur les différentes manières de la prendre en compte.

3.2.1. Méthodologie

Dans une étude classique de dimensionnement, on peut distinguer les phases suivantes.

- Collecte des données, concernant principalement les discontinuités, les caractéristiques mécaniques (des roches et des discontinuités), l'eau souterraine et les sollicitations dynamiques.
- Identification des mécanismes de rupture possibles.
- Construction d'un (ou plusieurs) modèle géométrique et mécanique, suffisamment simple pour permettre une analyse quantitative de la stabilité.
- Analyse de la stabilité par un calcul analytique, une simulation numérique ou analogique.
- Définition d'un dispositif de surveillance.

Certaines de ces phases doivent souvent être répétées dans le cadre d'un processus itératif.

Le plus souvent, le degré de stabilité vis à vis de la rupture est estimé au moyen d'un coefficient F , appelé coefficient de sécurité. Celui-ci peut être défini comme le rapport d'une contrainte admissible à une contrainte agissante. Dans le cas simple d'un glissement plan (figure 2), on considère la contrainte de cisaillement moyenne sur la surface de rupture. Le coefficient de sécurité F est alors le rapport de la force résistante maximale pouvant s'opposer au glissement à la force motrice tendant à le provoquer. Il y a donc rupture de la pente si F est inférieur à 1.

D'une manière générale, la contrainte admissible dépend des caractéristiques de résistance des discontinuités (résistance au cisaillement ou à la traction) ou de la matrice rocheuse (critère de rupture). La contrainte agissante résulte du poids de la roche, des sollicitations dynamiques (séismes ou autres vibrations), de la pression de l'eau dans les discontinuités et des efforts de renforcement.

3.2.2. Aspect aléatoire

Dans la plupart des cas, l'incertitude qui pèse sur les données est très importante. D'abord, la structure du massif ne peut jamais être connue parfaitement. En effet, contrairement aux matériaux fabriqués par l'homme, dont la structure et les propriétés mécaniques sont relativement bien connues, le milieu rocheux est très complexe et les moyens de l'observer sont limités et coûteux. Ensuite, les caractéristiques mécaniques des roches et des discontinuités déterminées expérimentalement sont généralement entachées d'une grosse incertitude, du fait de l'impossibilité de réaliser des essais à une échelle représentative. Par exemple, on peut fréquemment faire une erreur d'un facteur 10 sur la cohésion des discontinuités. Enfin, les pres-

sions d'eau régnant dans le massif sont souvent mal connues, car les connexions entre les fractures des massifs rocheux sont complexes et le niveau d'eau dans un forage n'est pas forcément représentatif d'une nappe aquifère. De plus, les fluctuations des nappes résultent de phénomènes météorologiques eux-mêmes aléatoires.

Toutes ces incertitudes se répercutent sur le modèle géomécanique du massif, et donc sur le résultat de l'analyse de stabilité. Le coefficient de sécurité apparaît donc comme une variable aléatoire.

3.3. Prise en compte de l'incertitude dans l'approche mécanique

3.3.1. Méthodes probabilistes

Des méthodes probabilistes quantitatives ont été proposées par différents auteurs (Hoek, 1998a). Elles permettent de déterminer la distribution de probabilité du coefficient de sécurité, à partir des distributions des différents paramètres. La méthode la plus courante consiste à analyser un grand nombre de modèles différents construits par tirage au sort des valeurs prises par les différents paramètres. On obtient ainsi un grand nombre de réalisations du coefficient de sécurité, qui permettent de connaître sa distribution de probabilité et donc la probabilité qu'il soit inférieur à 1. Dans cette approche, le modèle géomécanique est un modèle probabiliste, défini par les distributions des différents facteurs influençant la stabilité.

Ces méthodes ont l'avantage de poser explicitement le problème du risque acceptable. A priori, la probabilité de rupture acceptable doit être choisie par le maître d'ouvrage. Pour les ouvrages de génie civil, ouverts au public, certains organismes ont proposé des niveaux de risque acceptables en terme de probabilité annuelle de décès ou de rupture (Hoek, 1998b; Nilsen, 2000). Suivant le pays et le type d'ouvrage, la probabilité annuelle de décès proposée varie de 10^{-4} à 10^{-2} . D'après Hoek (1991), une probabilité de rupture de 10 à 15% peut être acceptable dans des mines à ciel ouvert, lorsque le coût induit est inférieur à celui d'une stabilisation.

Bien qu'elles soient satisfaisantes du point de vue théorique, les méthodes probabilistes sont rarement utilisées dans la pratique, car les données disponibles sont généralement insuffisantes pour connaître de manière satisfaisante les distributions des facteurs. Elles pourraient cependant être utilisées plus souvent, à condition de préciser que les probabilités obtenues ne donnent qu'un ordre de grandeur très grossier de la probabilité de rupture.

3.3.2. Méthodes déterministes

Dans l'approche déterministe, on réalise généralement une étude paramétrique, en faisant varier les paramètres sensibles mal connus, le nombre de simulations étant

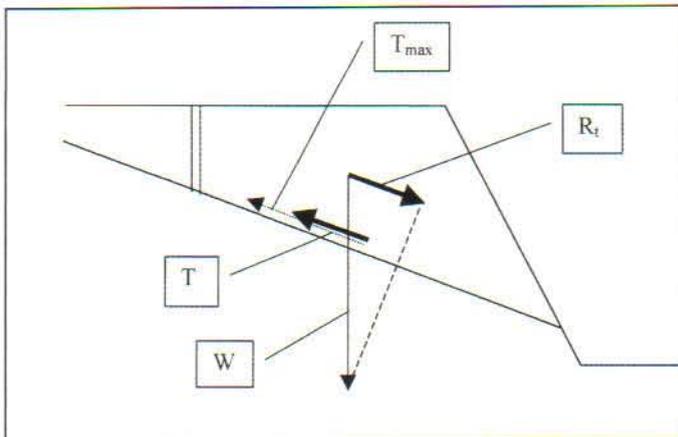


Figure 2 - Evaluation de la stabilité pour un glissement plan :
 W : poids ; R_t : force motrice ; T : force résistante ;
 T_{max} : force résistante maximale ;
 coefficient de sécurité : $F = T_{max} / R_t$

cependant beaucoup plus petit que dans l'approche probabiliste. Mais, pour évaluer la stabilité d'un projet, il faut finalement choisir un modèle géomécanique de référence, qui donnera une valeur du coefficient de sécurité (ou d'un autre paramètre choisi pour évaluer la stabilité). Le choix de ce modèle comporte nécessairement une part de subjectivité, d'autant plus qu'il n'existe pas de règles bien définies. Deux tendances peuvent être distinguées dans les choix à effectuer lors de l'élaboration du modèle géomécanique de référence : la tendance réaliste (choix de l'hypothèse la plus probable) et la tendance pessimiste.

La **modélisation réaliste** consiste à choisir, pour chacun des facteurs intervenant dans la stabilité, les hypothèses les plus probables. Elle aboutit donc au coefficient de sécurité le plus probable (F_p) pour la pente étudiée. Une valeur de F_p juste supérieure à 1 correspond à une probabilité de rupture de l'ordre de 0,5, qui n'est généralement pas acceptable. Il est donc nécessaire de prendre une "marge de sécurité" importante en choisissant une valeur requise de F_p nettement supérieure à 1. Cette marge dépend de la dispersion ou de l'incertitude qui affecte les différents facteurs.

La **modélisation pessimiste** consiste à choisir l'hypothèse la plus défavorable parmi les hypothèses vraisemblables. Le coefficient de sécurité d'un modèle pessimiste (F_m) est donc une estimation par défaut du coefficient de sécurité de la pente réelle. Théoriquement, une valeur juste supérieure à 1 permet donc de garantir la stabilité d'une pente future avec un risque d'erreur très faible. En effet, la probabilité que plusieurs hypothèses pessimistes se réalisent simultanément est très faible (c'est le produit de plusieurs probabilités elles-mêmes faibles). Cependant, il subsiste toujours une incertitude liée à la méthode d'analyse utilisée, qui conduit à adopter une valeur minimale requise plus grande que 1.

La **méthode des coefficients de sécurité partiels** consiste à construire un modèle pessimiste à partir d'un modèle réaliste, en affectant à chaque paramètre quantita-

tif un coefficient de sécurité partiel dépendant de sa dispersion. Cette méthode est utilisée en génie civil pour le calcul des soutènements par clouage des sols. Les recommandations issues du projet national Clouterre (1991) donnent des valeurs de coefficients de sécurité partiels à appliquer aux paramètres mécaniques des sols, ainsi qu'un coefficient de méthode de 1,125 (valable pour des calculs de glissements par des méthodes de tranches). De telles recommandations ne sont possibles que pour un type d'ouvrage particulier et dans des sols. Elles ne sont pas concevables pour des pentes rocheuses, du fait de la diversité des structures et des mécanismes de rupture possibles.

En **pratique**, lors de l'élaboration d'un modèle de référence, certains choix peuvent être pessimistes et d'autres réalistes (l'option prise doit être précisée). Cela explique que la valeur requise pour le coefficient de sécurité calculé F_c peut varier dans des proportions importantes (entre 1,1 et 2). Seul, l'ingénieur qui effectue ces choix est en mesure de déterminer la marge de sécurité nécessaire sur F_c , en tenant compte également des conséquences possibles d'une rupture. Il serait donc dangereux de vouloir fixer des valeurs minimales réglementaires pour le coefficient de sécurité. L'absence de quantification de la probabilité de rupture rend difficile la tâche du géotechnicien et provoque un certain transfert de responsabilité du maître d'ouvrage vers l'ingénieur. L'emploi d'une méthode probabiliste, même si elle ne peut fournir qu'un ordre de grandeur très grossier, permettrait au maître d'ouvrage de fixer un risque de rupture acceptable. D'autre part une probabilité de rupture est plus parlante, plus significative de la réalité qu'un coefficient de sécurité. En revanche, ce dernier est plus rassurant pour le client d'une étude.

4. ÉVALUATION DES PENTES INSTABLES

4.1. Spécificité des pentes instables

Par rapport aux études de pentes futures, il existe, dans le cas des pentes instables, des données relatives aux mouvements de la pente. Des mesures de déplacement absolu ou relatif, en surface et en profondeur, permettent d'appréhender le volume concerné et le mécanisme du mouvement. Les différentes méthodes de mesure sont décrites dans plusieurs articles et ouvrages (Wojtkowiak, 1988; METT, 1994). Mais le problème principal est celui de l'évolution future du mouvement sur une période donnée : stabilisation, poursuite d'un mouvement lent ou mouvement rapide ? La prévision du comportement futur de la pente nécessite d'expliquer les mouvements observés. Dans le paragraphe suivant, nous tentons d'expliquer certains mouvements de pente par des modèles simples de comportement.

4.2. Types de comportement

4.2.1. Mouvements sans modification des contraintes

Les différents comportements possibles d'une pente excavée sont les mêmes que ceux obtenus lors d'un essai de **fluage**, qui consiste à appliquer une contrainte constante à un échantillon rocheux (figure 3). L'application de cette contrainte correspond à l'excavation de la pente, qui se traduit par une augmentation des contraintes de cisaillement. Ce chargement provoque d'abord une déformation élastique instantanée, puis une déformation élastique différée, appelée aussi fluage primaire. Ces déformations, qui finissent par se stabiliser, correspondent à l'expansion associée à la décompression.

Pour certaines roches, qui présentent un comportement visqueux, on observe une déformation à vitesse constante, appelée **fluage permanent** ou secondaire. Ce type de comportement permet d'expliquer l'écoulement des glaciers. Certains glissements lents, dont les vitesses ont pu être reconstituées sur plus d'un siècle, pourraient probablement être expliqués par le fluage de couches marneuses ou schisteuses. A notre connaissance, aucun essai de fluage n'a été réalisé sur des roches ou des discontinuités impliquées dans un mouvement de versant.

Si la contrainte appliquée est suffisamment proche de la contrainte de rupture de la roche, on observe un fluage tertiaire qui aboutit à la rupture de l'échantillon. Ce type de comportement permet d'expliquer certains éboulements, qui ont été précédés d'une accélération sans modification apparente des contraintes dans la pente. Dans quelques cas, l'analyse mathématique des mouvements a permis de prévoir la date de l'éboulement (Azimi et al, 1988 ; Hoek et Bray, 1981). Plusieurs processus physiques peuvent expliquer ce type de rupture de pente sans modification des contraintes : altération ou dissolution de certains minéraux ; phénomène de fatigue dû à une succession d'états de contraintes proches du critère de rupture. Ces processus se traduisent par une lente diminution de la résistance du massif.

4.2.2. Mouvements dus à des variations des contraintes actives

De nombreux mouvements se produisent lorsque l'état de contrainte dans la pente atteint un certain **critère (de rupture, d'écoulement plastique ou visqueux)**. La dynamique de la rupture dépend alors des propriétés rhéologiques de la roche et de la durée pendant laquelle le critère est dépassé.

Si l'excès de contrainte est suffisamment bref, le mouvement peut s'arrêter jusqu'à un nouveau dépassement du critère résiduel (figure 4, modèle plastique). Cette situation peut se produire lors d'une rupture provoquée par un tir de mine, un séisme ou une augmentation de pression d'eau. En effet, dans les deux premiers cas, l'excès de

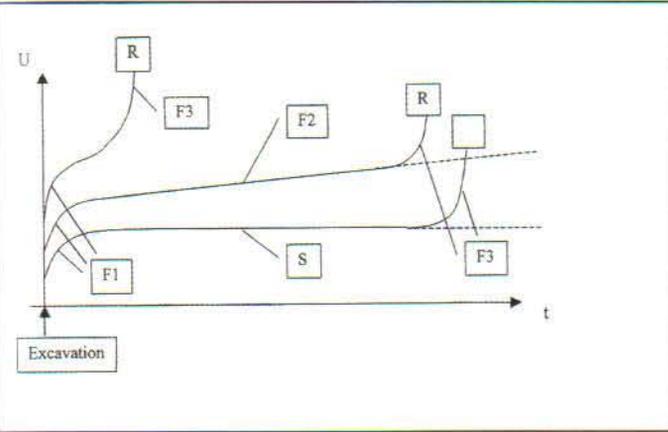


Figure 3. Comportements possibles d'une pente rocheuse sans modification des contraintes.

U: déplacement; t: temps; F1: fluage primaire; S: stabilité; F2: fluage permanent; F3: fluage tertiaire; R: rupture

contrainte n'existe que pendant une durée très brève (quelques secondes). Dans le second, l'ouverture des fractures entraîne une diminution des pressions d'eau. Le mouvement peut se poursuivre par à-coups, si l'infiltration dure suffisamment longtemps pour les faire remonter.

Si l'excès de contrainte persiste, le mouvement accélère et devient un mouvement rapide. C'est le cas, par exemple, lorsqu'il est provoqué par une modification de la topographie de la pente (remblai en tête ou déblai en pied). C'est le cas aussi lorsque la résistance atteint une valeur résiduelle inférieure à la contrainte habituelle dans la pente.

Si la roche ou les discontinuités ont un comportement à caractère visqueux, l'augmentation des contraintes provoque une augmentation de la vitesse de fluage (figure 4, modèle visqueux). Un tel phénomène peut également être expliqué par une diminution temporaire de la viscosité.

4.2.3. Evolution des mouvements

Les mouvements de pente rocheuse peuvent être influencés par d'autres facteurs que ceux qui viennent d'être évoqués. Dans le cas des glissements, la forme de la surface de glissement et de la pente topographique en aval jouent un rôle important : une diminution rapide de la pente peut stabiliser le mouvement par butée. L'ouverture ou le cisaillement de certaines fractures peut accroître la perméabilité du massif et le rendre moins sensible aux infiltrations d'eau. Certains mécanismes de rupture (glissement à deux blocs, par exemple) peuvent aboutir à une stabilisation par effet de butée ; la reprise du mouvement nécessite alors une nouvelle rupture. L'apparition d'une nouvelle surface de rupture peut modifier le mécanisme du mouvement (évolution d'un fauchage vers un glissement, par exemple).

Des mouvements peuvent se poursuivre pendant des dizaines d'années avant d'aboutir à une stabilisation ou un éboulement.

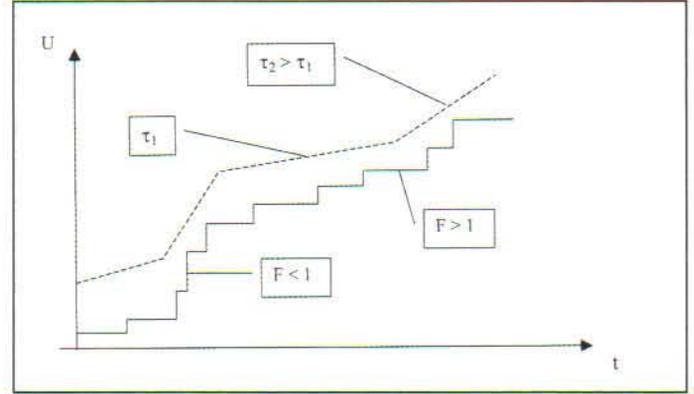


Figure 4. Mouvements dus à des variations des contraintes actives. Trait plein: modèle plastique; F: coefficient de sécurité. Tirets: modèle visqueux; t: contrainte de cisaillement.

4.3. La prévision du type d'évolution

Du fait de la variété et de la complexité des processus qui peuvent intervenir dans un mouvement de pente, la détermination des scénarios d'évolution possibles nécessite une analyse approfondie des mouvements, qui n'est généralement possible qu'après un suivi ou une auscultation d'une durée suffisante. Cette analyse aboutit à un modèle géomécanique du mouvement. Mais, contrairement au cas du dimensionnement de pentes futures, ce modèle n'est pas destiné à évaluer le degré de stabilité, mais à prévoir les évolutions possibles du mouvement.

Les méthodes mécaniques permettant de prévoir ces évolutions sont peu nombreuses et peu éprouvées. La méthode des éléments distincts a été utilisée par Alfonsi et al (1998) pour étudier les évolutions possibles d'un talus affecté par un phénomène de basculement de blocs. Suivant l'angle de talus, le pendage des joints et leurs propriétés mécaniques, les mouvements se stabilisent ou aboutissent à un éboulement. Cette méthode a également été utilisée par Vengeon et al (1999) dans le cas d'un mécanisme plus complexe, dans lequel l'évolution du mouvement est liée à la rupture possible de certains blocs fortement sollicités en flexion. En pratique, la prévision du type d'évolution des pentes instables s'appuie en grande partie sur l'expérience des experts.

Si une évolution vers un mouvement rapide est possible, il peut être nécessaire de déterminer la zone susceptible d'être atteinte par celui-ci (zone d'épandage). Il existe pour cela des méthodes de simulation, dont certaines ont été validées et sont couramment utilisées dans les bureaux d'études spécialisés (Azimi et al., 1982 ; Rochet, 1987 ; Descoedres, 1987).

4.4. La surveillance

Si une pente instable représente un risque important pour des personnes ou des biens, une surveillance est nécessaire (Rochet, 1991). Celle-ci a pour but de garantir la sécurité pour un certain délai. Pour des volumes impor-

tants (plusieurs millions de m³), ce délai peut être de l'ordre de la journée. En effet, les éboulements de pentes rocheuses se produisent rarement sans signes précurseurs. Le délai est plus court pour des volumes plus faibles. Certains éboulements de petite taille ne peuvent probablement pas être prévus plus de quelques secondes ou quelques minutes à l'avance.

D'une manière générale, la sécurité peut être garantie si les mouvements passés peuvent être expliqués et si leur analyse permet de prévoir une évolution qui ne conduit pas à un scénario d'éboulement dans le délai considéré. Généralement, lorsqu'une accélération ne peut pas être expliquée par une augmentation transitoire des contraintes actives (pression d'eau ou séisme), on ne peut pas exclure la possibilité qu'il s'agisse d'un phénomène de type fluage tertiaire, pouvant conduire à un éboulement. Dans le cas contraire, c'est la confrontation avec des situations passées qui permet de prévoir un retour à un régime normal ou un risque d'éboulement. Lorsque l'accélération est due à une augmentation des pressions d'eau, le délai sur lequel peut porter la prévision est du même ordre que celui des prévisions météorologiques (quelques jours au maximum). Dans le cas d'un séisme important, la réaction d'une pente peut être très rapide. La sécurité ne peut pas être garantie vis à vis de ce type de phénomène, heureusement très rare.

Il est rare qu'un éboulement important se produise sur une pente surveillée sans que le risque d'éboulement n'ait été annoncé. Il arrive plus souvent qu'un risque soit annoncé et que l'éboulement ne se produise pas. Cette situation normale résulte de l'application du principe de précaution. Mais elle peut conduire à une perte de crédibilité envers les experts. Pour y remédier, il est nécessaire que les mécanismes de mouvement soient mieux compris.

5. ÉVALUATION DES PENTES STABLES

5.1. Spécificité des pentes stables

Ce paragraphe concerne les pentes stables, dont l'évolution future doit être évaluée. On cherche à savoir si des ruptures risquent de se produire sur une certaine période. Le problème posé est, en quelque sorte, symétrique par rapport à celui du dimensionnement. En effet, celui-ci consistait à concevoir une pente dont la probabilité de rupture soit inférieure à une valeur donnée (plus ou moins explicitement). L'évaluation des pentes stables consiste, au contraire, à déterminer la probabilité de rupture, dans un délai donné, d'une pente dont les dimensions sont connues et dont la stabilité actuelle est avérée. La rupture d'une pente rocheuse ayant un caractère aléatoire, on emploie le terme d'aléa pour désigner le phénomène ou sa probabilité d'occurrence. Les spécialistes de risques natu-

rels réservent le terme de risque au dommage probable résultant de l'aléa. Le risque dépend donc de l'aléa et de la vulnérabilité des biens ou des personnes exposés.

5.2. Méthodologie

Les études d'aléa comportent généralement les étapes suivantes.

a. Collecte des données géologiques et géomécaniques

Le type de données est le même que dans les études de dimensionnement, mais les surfaces concernées sont généralement plus importantes et les reconnaissances moins détaillées.

b. Identification des zones de départ potentielles

Elle consiste à rechercher les configurations géométriques permettant une rupture. Les configurations les plus courantes sont représentées sur la figure 1.

c. Construction d'un modèle géométrique et mécanique, permettant une analyse qualitative de la stabilité et de son évolution

d. Pour chaque zone de départ potentielle, évaluation de la probabilité de rupture dans un certain délai (évaluation de l'aléa)

e. Détermination de la zone d'épandage maximale et éventuellement de l'énergie des blocs

L'étape c (modélisation) n'apparaît pas forcément dans les rapports, mais elle est bien présente dans la démarche de l'expert (le raisonnement qui conduit à l'évaluation de l'aléa s'appuie nécessairement sur une représentation schématique du massif rocheux).

Pour les étapes a, b et c, les démarches utilisées dans les études de dimensionnement et dans les études d'aléa sont comparables. Par contre, les méthodes d'analyse mécanique quantitative utilisées en dimensionnement ne sont généralement pas d'une grande utilité dans l'évaluation de l'aléa.

Dans le cas d'une pente existante stable, on sait que son coefficient de sécurité est supérieur à 1 dans les conditions actuelles ; le problème est de savoir combien de temps il le restera. La connaissance des mécanismes d'évolution des pentes stables étant essentiellement qualitative, il est actuellement impossible de répondre à cette question de manière déterministe, ni même de manière quantitative. On cherche donc à évaluer qualitativement (à qualifier) la probabilité que la pente devienne instable dans un certain délai. Cette évaluation résulte généralement d'un jugement d'expert, basé à la fois sur un raisonnement géomécanique et sur l'expérience, acquise à travers l'étude d'éboulements passés, survenus dans des conditions variées.

Nous distinguerons donc une approche géomécanique et une approche empirique.

5.3. Approche géomécanique

Une masse rocheuse se met en mouvement lorsque les forces motrices qui s'exercent sur elle (poids, pressions, séismes...), deviennent supérieures aux forces résistantes maximales que peuvent supporter les discontinuités qui la délimitent (ou la matrice rocheuse en cas de rupture de celle-ci). Les différents processus pouvant intervenir dans la rupture d'une pente rocheuse sont donc ceux qui contribuent à diminuer la résistance du massif ou à augmenter les forces motrices. Les plus importants sont décrits ci-dessous.

La **diminution de la résistance** peut être due à la dissolution ou l'altération de certains minéraux, à la réduction du frottement due à l'action de l'eau sur le remplissage argileux de certaines discontinuités ou à l'endommagement progressif de la roche sous l'effet de sollicitations répétées (séismes, tirs, mises en pression par l'eau souterraine). L'activité de ces différents mécanismes de dégradation peut être évaluée, notamment à partir d'observations concernant la présence ou la circulation de l'eau dans le massif ainsi que des données concernant la sismicité régionale.

L'**évolution de la surface topographique** modifie les contraintes et les forces motrices. Elle peut être due à des processus naturels (érosion, dépôt) ou à des travaux (excavation, remblai). On peut la mettre en évidence grâce à une étude géomorphologique sur photographies aériennes, ainsi que par des observations de terrain.

Des variations temporaires des forces motrices, entraînant la rupture, peuvent se produire sous l'effet de phénomènes naturels, comme les **variations des pressions hydrauliques** ou les **séismes**, ou artificiels, comme les **tirs de mines**. Contrairement aux autres processus décrits précédemment, ces sollicitations sont généralement rapides (quelques secondes à quelques jours) et liées à des événements reconnus. La plupart des versants naturels sont soumis, depuis plusieurs siècles, à des séismes et des pressions hydrauliques, sans pour autant s'être éboulés. En effet, ces phénomènes ne déclenchent des éboulements que s'ils ont une intensité exceptionnelle ou si le degré de stabilité est devenu critique par l'action d'autres processus.

Le développement des **racines** et l'effet du **vent** sur les arbres peuvent induire des forces motrices non négligeables pour de petits volumes rocheux.

Un certain nombre de ruptures sont donc liées à des événements identifiables, qui provoquent une augmentation sensible des forces motrices ; d'autres ne sont associées à aucun événement perceptible et peuvent être attribuées, par exemple, à la dégradation des propriétés mécaniques du massif rocheux ou à une modification progres-

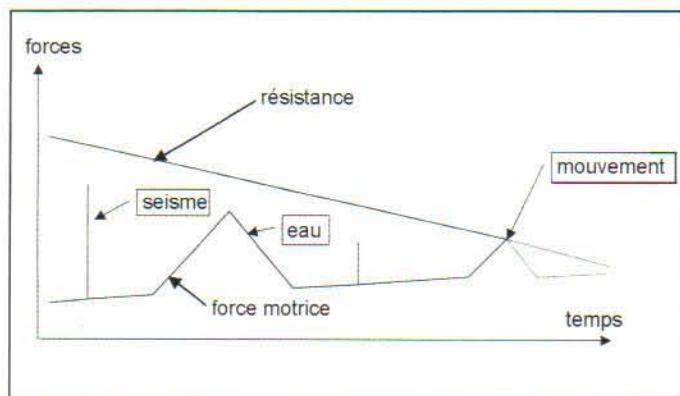


Figure 5a : schématisation des processus conduisant à l'instabilité
Mouvement déclenché par un événement aléatoire (augmentation de pression hydraulique)

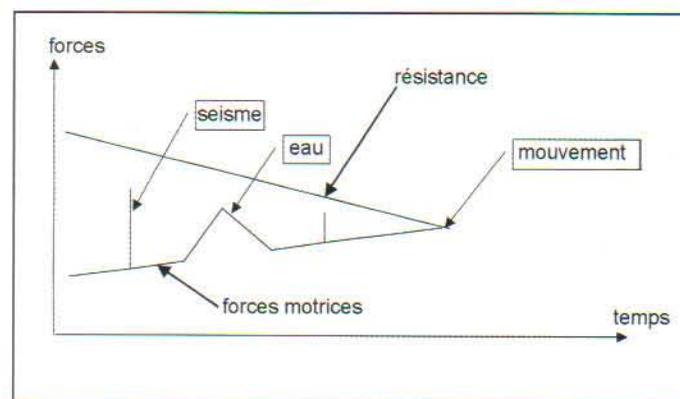


Figure 5b : schématisation des processus conduisant à l'instabilité
Mouvement dû à la dégradation des propriétés mécaniques et à l'augmentation de la contrainte active

sive de la surface du versant, par érosion ou accumulation. Ces deux types de rupture sont illustrés, de manière simplifiée, sur les figures 5a et 5b. La courbe supérieure représente l'évolution de la force résistante maximale, qui diminue régulièrement, et la courbe inférieure celle de la force motrice, qui augmente régulièrement et subit des augmentations temporaires dues à des variations de pression d'eau ou à des séismes. La rupture se produit lorsque les deux courbes se rejoignent. Sur la figure 5a, elle est provoquée par une augmentation de pression d'eau, et sur la figure 5b, elle est due à la diminution progressive de la résistance et à l'augmentation des forces motrices. La probabilité de rupture, pour un certain délai, dépend donc :

- du degré de stabilité actuel de la masse susceptible de s'ébouler (on sait déjà que son coefficient de sécurité est supérieur à 1 dans des conditions courantes)
- de l'évolution lente de ce degré de stabilité au cours du temps (due aux différents facteurs dégradants, qui réduisent la résistance ou augmentent les contraintes actives)
- de la probabilité d'occurrence de sollicitations exceptionnelles (séisme centennal, pression hydraulique exceptionnelle) et de la vulnérabilité de la masse rocheuse étudiée à ces sollicitations.

L'évaluation se traduit le plus souvent par l'attribution

d'un qualificatif dans une échelle de 3 à 5 degrés (par exemple : aléa fort, moyen ou faible).

5.4. Approche empirique

Si la zone étudiée est suffisamment homogène d'un point de vue géomécanique et morphologique, les informations éventuelles sur son comportement passé (étude historique d'éboulements anciens, observations morphologiques) sont prises en compte dans l'évaluation des aléas. D'autre part, certains auteurs proposent un indice d'évaluation de l'aléa, obtenu en additionnant des notes correspondant aux différents facteurs favorables aux éboulements. Le choix des facteurs et des coefficients de pondération des différentes notes est généralement empirique (Cancelli et Crosta, 1993; Rouiller et al, 1998; Hoek, 1998b).

6. CONCLUSION

Pour les études de dimensionnement, l'absence de quantification de la probabilité de rupture dans les méthodes déterministes, provoque un certain transfert de responsabilité du maître d'ouvrage vers l'ingénieur. Les méthodes probabilistes, même si elles ne peuvent encore fournir qu'un ordre de grandeur très grossier, permettent au maître d'ouvrage de fixer un risque de rupture acceptable. Elles méritent donc d'être développées.

Pour les pentes instables, une auscultation de durée suffisante et une modélisation du comportement permettent de déterminer des scénarios d'évolution possibles du mouvement. Pour des volumes importants (plusieurs millions de m³), la surveillance permet généralement de garantir la sécurité à court terme (sur une durée de l'ordre de la journée).

Dans le cas des pentes stables, il est impossible de prévoir quantitativement leur durée de vie. On cherche donc à évaluer qualitativement (à qualifier) la probabilité que la pente devienne instable dans un certain délai. Cette qualification résulte généralement d'un jugement d'expert, basé à la fois sur un raisonnement géomécanique et sur l'expérience. Des progrès importants pourraient être réalisés dans ce domaine, grâce à l'analyse des éboulements passés, qui ont été peu étudiés jusqu'à présent.

BIBLIOGRAPHIE

Alfonsi P, Durville JL, Rachez X, 1998. Quelques applications de la méthode des éléments distincts en mécanique des roches. Bull Laboratoires des Ponts et Chaussées, 214: 31-43.

- Azimi C, Desvarreux P, Giraud A, Martin-Cochet J, 1982.** Méthode de calcul de la dynamique des chutes de blocs. Bull. liaison Labo P. et Ch., 122, pp.93-102.
- Azimi C, Desvarreux P, 1996.** Quelques aspects de la prévision des mouvements de terrain. Revue Française de Géotechnique, 76: 63-75.
- Cancelli A, Crosta G, 1993.** Hazard and risk assessment in rockfall prone areas. In: Proc Conf on Risk and Reliability in Ground Engineering, London, pp 177-190.
- CFGI (Comité Français de Géologie de l'Ingénieur), 2000.** Caractérisation et cartographie de l'aléa dû aux mouvements de terrain. Collection "Environnement - Les risques naturels", Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 91p.
- CFMR (Comité Français de Mécanique des Roches), 2000.** Manuel de mécanique des roches. 2 tomes, Presses de l'Ecole des Mines, Paris.
- Cojean R, 1998.** Stabilité des talus de carrières et mines à ciel ouvert, principes de dimensionnement. In: Memento des Mines et Carrières, n°4, pp.212-233.
- Cruden DM, Varnes DJ, 1996.** Landslide types and processes. In: Landslides, Investigation and Mitigation, pp.36-75. National Academy Press, Washington, D.C.
- Descoeudres F, Zimmermann T, 1987.** Three-dimensional dynamic calculation of rockfalls. In: Proc. 6° ISRM Congress, Vol. 1, pp.337-342.
- Duffaut P, 1994.** Stabilité des barrages et des pentes naturelles. In: 18° Congrès des Grands Barrages, Durban, pp.809-822.
- Hantz D, 1987.** La conception des talus de mines à ciel ouvert. Industrie Minérale, les Techniques, nov. 1987, pp.356-362.
- Hoek E, Bray JW, 1981.** Rock Slope Engineering. The Institution of Mining and Metallurgy, London, 358 pages.
- Hoek E, 1991.** When is a design in rock engineering acceptable? In: Proc. 7° ISRM Congress, Vol. 3, pp.1485-1497.
- Hoek E, 1998a.** Factor of safety and probability of failure. In: Rock Engineering, Course notes; Chapter 8; <http://www.rockeng.utoronto.ca/hoekcorner.htm>, pp 105-114
- Hoek E, 1998b.** Analysis of rockfall hazards. In: Rock Engineering, Course notes; Chapter 9; <http://www.rockeng.utoronto.ca/hoekcorner.htm>, pp 115-136
- METT (Ministère de l'Équipement, du Transport et du Tourisme), 1994.** Surveillance des pentes instables. Guide technique. Laboratoire central des ponts et chaussées.
- Nilsen B, 2000.** New trends in rock slope stability analysis. Bull Eng Geol Env 58:173-178.
- PPR, 1999.** Plans de Prévention des Risques naturels, risques de mouvements de terrain. Guide méthodologique. Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, ministère de l'équipement, du logement et des transports. La documentation française, 71 pages.
- UNESCO, 1990.** A suggested method for reporting a landslide. The International Geotechnical Societies' UNESCO Working Party on World Landslide Inventory. Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, n°41, pp.5-12.

Rochet L, 1987. Développement des modèles numériques dans l'analyse de la propagation des éboulements rocheux. In: Proc. 6° ISRM Congress, Vol. 1, pp.479-484.

Rochet L, 1992. Mouvements de versants de grande ampleur: auscultation, diagnostic, surveillance. Bull Eng Geol Env 45:43-57.

Romana M, 1993. A geomechanical classification for slopes: Slope Mass Rating. In: Hudson J (ed) Comprehensive rock engineering, Vol. 3. Pergamon, pp 575-600

Romana M, 1995. The geomechanical classification SMR for slope correction. In: Proc. 8° ISRM Congress, Vol. 3, pp 1085-1092

Rouillet JD, Jaboyedoff M, Marro C, Philipposian F, Mamin M, 1998. Matterrock: une méthodologie d'auscultation des falaises et de détection des éboulements majeurs potentiels. Rapport PNR 31, VDF, Zurich, 239 pages.

Vengeon JM, Hantz D, Giraud A, Rochet L, 1999. Recherche du mécanisme de déformation d'un versant rocheux métamorphique. In: Proc. 9° ISRM Congress, Paris, Vol. 1, pp 145-148.

Wojtkowiak F, 1988. La stabilité des flancs de mines et carrières à ciel ouvert. Industrie Minérale, Mines & Carrières, mai 1988.



Didier HANTZ

Né en 1954, Ingénieur Civil des Mines (Nancy) en 1977, docteur-ingénieur de l'Université de Grenoble en 1981. Ingénieur de recherche au CERCHAR (Centre d'Etudes et de Recherches de Charbonnages de France) de 1982 à 1989, ses travaux portent essentiellement sur la stabilité des mines et carrières à ciel ouvert (dimensionnement, auscultation, diagnostic, confortement). Enseignant-chercheur à l'Université

Joseph Fourier depuis 1989, il enseigne la mécanique des roches aux élèves-ingénieurs en Géotechnique de ISTG (Institut des Sciences et Techniques de Grenoble). Ses recherches, dans le cadre du LIRIGM (Laboratoire Interdisciplinaire de Recherche impliquant la Géologie et la Mécanique), portent principalement sur l'évaluation et la prévention des risques liés à l'instabilité des pentes rocheuses naturelles et artificielles.