

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES

Chapitre 4 – Les mouvements gravitaires

Section 4.1 : Notions de base

- Fiche 4.1.1 : Les forces en présence
- Fiche 4.1.2 : Causes des instabilités
- Fiche 4.1.3 : Propriétés physiques des sols et des roches (1/2)
- Fiche 4.1.4 : Propriétés physiques des sols et des roches (2/2)
- Fiche 4.1.5 : Mesures de protection face aux mouvements gravitaires

Section 4.2 : Les différents types de mouvements gravitaires

- Fiche 4.2.1 : Classification des mouvements gravitaires
- Fiche 4.2.2 : Les déplacements sans rupture réelle
- Fiche 4.2.3 : Les déplacements avec ruptures : les chutes
- Fiche 4.2.4 : Les glissements (1/2)
- Fiche 4.2.5 : Les glissements (2/2)
- Fiche 4.2.6 : Les mouvements fluides
- Fiche 4.2.7 : Avalanches et reptation nivale
- Fiche 4.2.8 : Autres mouvements gravitaires

Section 4.3 : Sources

- Fiche 4.3.1 : Références bibliographiques



■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES

4.1.1 Forces en présence

On appelle **mouvement gravitaire** tout déplacement de matériaux induit par **la gravité**. Un mouvement gravitaire peut ainsi recouvrir des phénomènes allant de la simple chute d'un bloc unique à l'écroulement d'un pan entier de versant.

▪ Forces en présence

La gravité est la principale force entrant en action dans le cadre des mouvements gravitaires. Elle n'est cependant pas la seule à s'exercer sur une portion de terrain dont les propriétés physiques et mécaniques entrent également en scène.

Comment se distribuent les différentes forces agissant sur une couche de terrain ? Pour répondre à cette question, il est possible d'assimiler la couche de terrain concernée à un bloc reposant sur une pente d'angle θ (fig.1).

Le poids **P** de ce bloc est égal au produit de sa masse (m) et de la gravité (g) ($P = m \cdot g$).

Le vecteur **P**, représenté sur le schéma ci-dessous, développe deux composantes :

- **Q** ($Q = P \cdot \cos\theta$) la **pression normale** (*normal stress*) qui est perpendiculaire à la surface de pente et **qui tend à maintenir l'objet en place**
- **S** ($S = P \cdot \sin\theta$) la **force/contrainte de cisaillement** (*shear stress*), parallèle à la pente et **qui tend à provoquer la mise en mouvement du matériel**.

Une autre force en présence est **R**, la **friction** ou **résistance au cisaillement** (*shear strength*). Il s'agit d'une force stabilisante dont la valeur maximale est donnée par la loi de Coulomb : $R = c + \sigma' \cdot \tan \alpha$; dans laquelle :

- c est la cohésion du matériel, soit la force qui maintient les particules du terrain ensembles
- σ' est la pression effective normale ou pression de pore, dépendant essentiellement de la teneur en eau liquide du matériau.
- α est l'angle de frottement interne, c'est-à-dire l'angle d'équilibre naturel d'un tas du terrain, angle au-delà duquel les particules de terrain seront mobilisées par le simple effet de la gravité.

La résistance au cisaillement dépend notamment de la morphologie des particules (pavés vs. billes), de la nature des liens existant dans le matériau et du pourcentage de vide (porosité) (sable sec vs. sable humide, fractures gelées ou non), de la rugosité et de la lubrification (par l'eau) de la surface de glissement, etc...

▪ Evolution de l'état de stabilité

L'état de stabilité peut évoluer et une pente stable sous certaines conditions peut devenir instable lorsque ces conditions changent. **Il y a ainsi rupture (ou mobilisation) lorsque $S > R$.**

Une diminution de la cohésion (c) et/ou de la pression effective normale (σ') conduit à une diminution de la résistance au cisaillement (R) ce qui peut être à l'origine d'une mise en mouvement du matériel. L'eau joue, à ce niveau, un grand rôle. Pour plus de détails à ce sujet, se référer à la fiche 4.1.3. Les causes des mouvements gravitaires sont, quant à elles, détaillées dans la fiche 4.1.2.



■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES

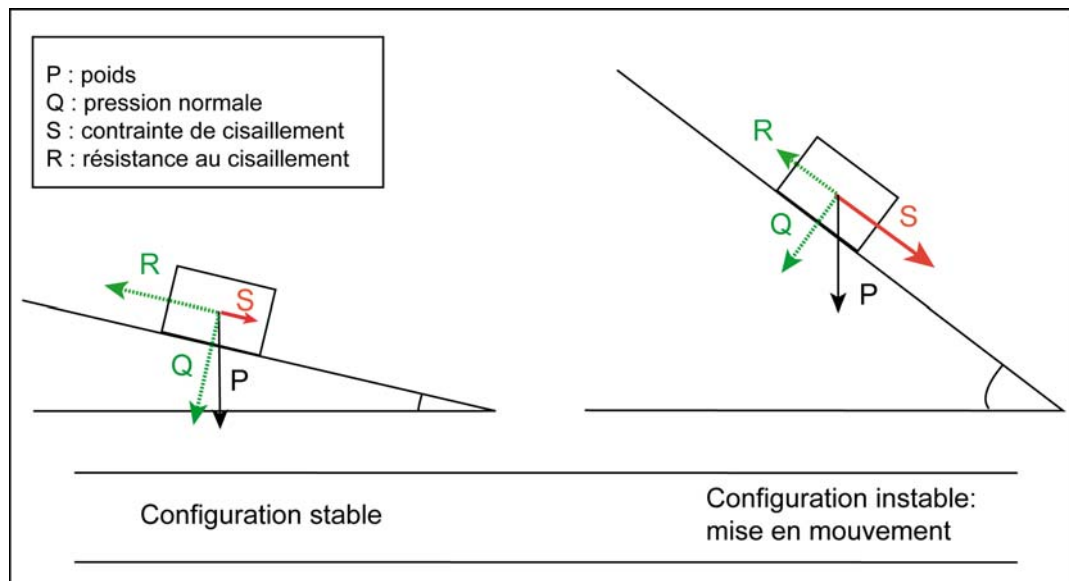


Fig. 1 – Forces s'exerçant sur un bloc (pouvant être assimilé à une couche de terrain).

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES

4.1.2 Causes des instabilités

Le passage de l'état stable à l'état instable est lié à des causes nombreuses et variées qui viennent s'ajouter aux conditions initiales, intrinsèques au terrain. On distingue les prédispositions (« facteurs passifs ») et les facteurs préparatoires et déclenchants (« facteurs actifs ») (fig.1).

a) Prédispositions :

- **La géologie**
 - la lithologie (composition, texture, granulométrie, caractères). Par exemple dans le cadre d'un glissement, les argiles sont particulièrement sensibles à l'eau.
 - La structure (le pendage, la présence de joints, de stratification, de plis, de schistosité qui constituent des zones de faiblesse dans un massif)
 - l'histoire du versant : un versant qui a déjà connu des mouvements gravitaires aura une certaine prédisposition à être instable à nouveau.
- **La pente**
 - Il n'y a pas de règle formelle mais on a constaté que les pentes les plus sujettes aux glissements ont une inclinaison qui va de 20 à 30°.
- **L'orientation**
 - On a également pu constater qu'il y a beaucoup plus de glissement sur les versants exposés au Nord.
- **La végétation**
 - La végétation a un rôle non négligeable car elle intervient d'une part au niveau des échanges d'eau (évapotranspiration) et d'autre part au niveau de la cohésion et de la fixation du sol (racines). En outre, la végétation diminue l'érosion du sol. Néanmoins, lorsque le couvert végétal est très dense, le poids est plus important, ce qui augmente les forces motrices.
- **Le contexte hydrogéologique et hydrographique**
 - Cela concerne, d'une part, la perméabilité du massif, les circulations d'eau souterraine, le drainage (hydrogéologie) et, d'autre part, le réseau hydrographique : ruissellement, proximité d'une source, d'un torrent, et leur potentiel érosif.
- **Le contexte climatique**
 - Soit la pluviométrie annuelle totale, la répartition des précipitations annuelles, la possible accumulation de neige, la température moyenne ainsi que l'évolution climatique.

b) Facteurs préparatoires et déclenchants (causes directes) :

- **Le climat : causes hydriques**
 - L'infiltration d'eau dans un terrain (pluies, fonte des neiges, crues de cours d'eau à proximité...) a des conséquences sur la cohésion du matériel qui offre, de fait, moins de résistance au cisaillement et peut se liquéfier.
 - Avec une importante présence d'eau, des surpressions peuvent se produire sous des blocs ou sous le terrain lui-même, notamment lorsqu'une partie du terrain est gelée.
 - Le poids du sol augmente avec l'humidité, ce qui augmente les forces déstabilisantes.



■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES

- **Le climat : causes thermiques**
 - Alternance de phases de gel/dégel (massage thermique et cryoclastie).
 - Dégradation du pergélisol, « ciment » des montagnes, avec le réchauffement global (cf. fiches 3.3.1-3.3.4).
- **Causes mécaniques : vibrations**
 - Sismicité/vibrations dues à un séisme ou à des activités humaines (explosion, passage d'un train). Il y a une augmentation momentanée du poids du terrain qui peut suffire pour que le seuil de stabilité soit franchi et que le terrain se mette en mouvement.
 - Phénomène de thixotropie : soumis à des vibrations, certains matériaux comme les argiles, par exemple, peuvent passer de l'état solide à l'état liquide.
- **Causes mécaniques : modification de la géométrie**
 - Modification de la répartition des masses par érosion en pied de versant (= zone frein) par une rivière par exemple ou par surcharge en haut d'une pente (= zone moteur) par exemple lors de la construction d'un bâtiment (fig.2).

L'origine du déclenchement d'une instabilité gravitaire est rarement unique, mais est la conséquence d'une **combinaison des prédispositions défavorables et de facteurs déclenchants** (fig.3).

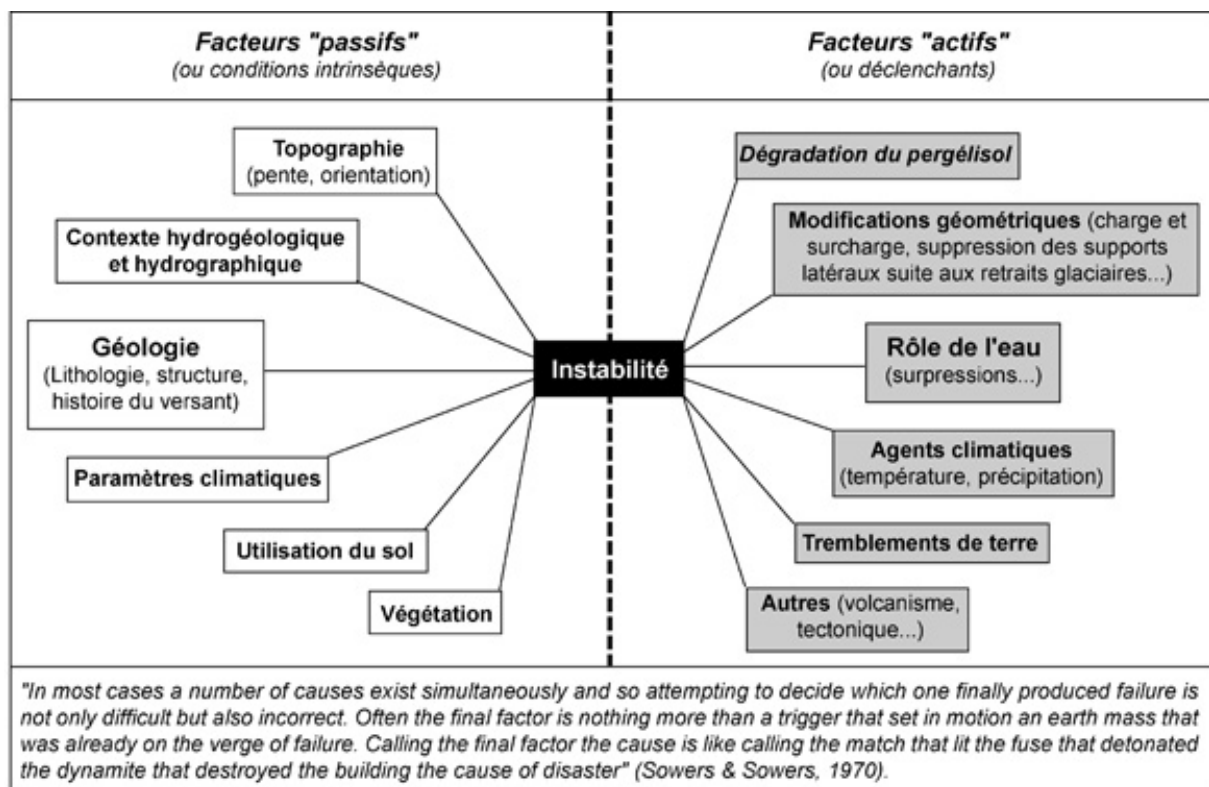


Fig. 1 – Facteurs passifs et actifs pouvant entraîner une instabilité

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES

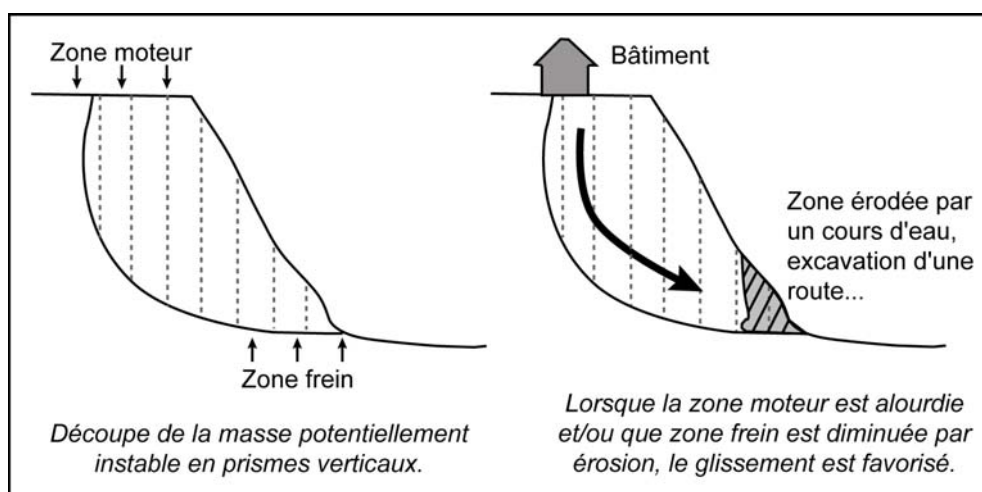


Fig. 2 – Modification de la répartition des masses dans un versant instable.

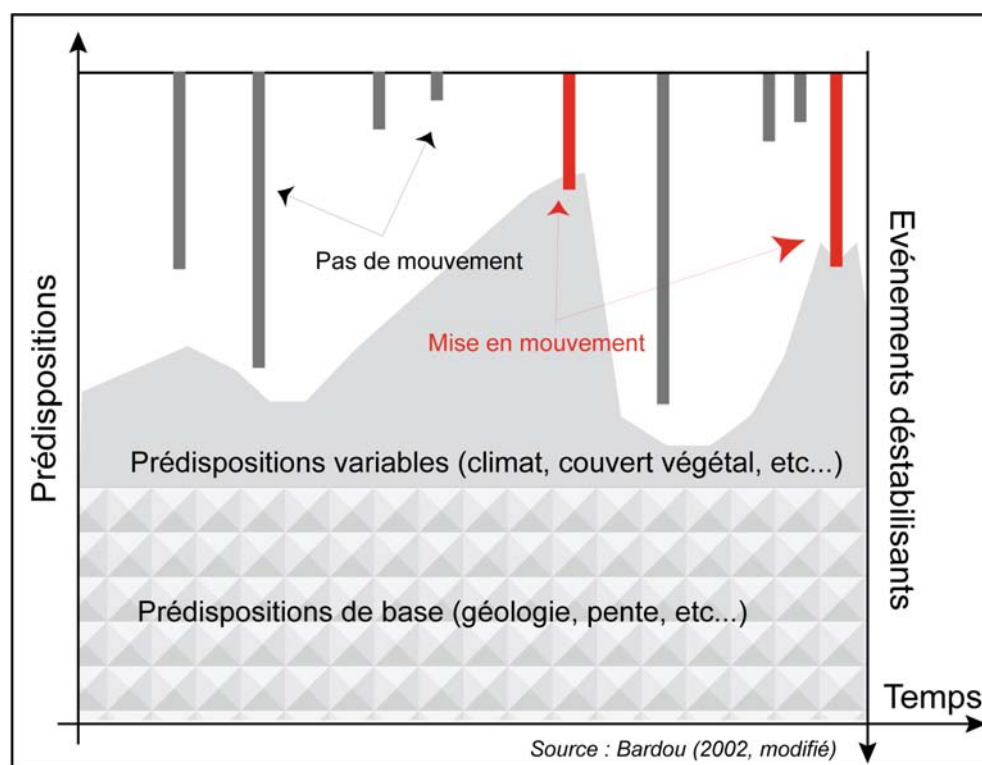


Fig. 3 – Relation prédisposition-événement déstabilisant intervenant dans le déclenchement des laves torrentielles (source : CREALP, Bardou 2002).

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES

4.1.3 Propriétés physiques des sols et des roches (1/2)

En géotechnique, le terme sol désigne l'ensemble des terrains meubles, sans prendre en compte le mode de formation. On peut décrire physiquement un sol comme un ensemble de grains solides. Plus ou moins rapprochés les uns des autres, ces grains sont faiblement liés entre eux et de l'air et/ou de l'eau liquide et/ou de la glace occupent les vides. Il s'agit donc d'un matériel qui peut aisément se fragmenter.

Par opposition, une roche est un agrégat de matière minérale consolidé par un ciment (cf. fiche 4.1.4). La différence entre un sol et une roche tient à la cohésion des grains : il n'y a pas de ciment dans un sol.

a) Les sols :

La granulométrie et la perméabilité des sols en sont des caractéristiques essentielles. On distingue les sols fins et peu perméables (limons, argiles et sables fins) des sols grossiers (sables grossiers et graviers) qui sont, eux, très perméables.

La loi de Coulomb qui donne la résistance au cisaillement (R) d'un sol comporte deux termes qui sont directement liés au sol et à ses caractéristiques intrinsèques : l'angle de frottement interne α et la cohésion c .

$$\text{Loi de Coulomb } R = c + \sigma' \tan \alpha$$

En ce qui concerne **la cohésion**, il faut souligner le rôle important de l'eau. En effet, lorsque la quantité d'eau est très importante, les particules du sol sont séparées les unes des autres et la cohésion du sol est alors nulle (fig. 1). En revanche la présence d'eau peut donner une certaine cohésion, cohésion apparente, à des sols qui n'en n'ont aucune lorsqu'ils sont secs. C'est par exemple, le cas des sables, parfaitement illustré par le château de sable dont la construction n'est possible qu'avec un sable qui ne soit ni trop sec ni trop humide. Dans les argiles et limons, cette cohésion apparente peut être très élevée. A noter que les sols grossiers, comme les graviers, ont une cohésion nulle, quelle que soit leur teneur en eau.

L'angle de frottement interne correspond à l'angle formé naturellement par un matériau mis en tas, par rapport à l'horizontale. Il dépend du type de sol et plus particulièrement de l'émoussé de ses grains : plus ces derniers sont anguleux, plus l'angle de frottement interne sera élevé. Ainsi, cet angle sera nettement plus élevé dans le cas de graviers que pour un sol à forte teneur en argiles.

Ces deux paramètres sont déterminés, pour un sol donné, par des essais en laboratoire.

Leur représentation par une droite, la droite de Mohr-Coulomb, (fig. 2) permet d'obtenir une représentation de la résistance au cisaillement de ce sol selon la contrainte (ou les contraintes) exercée sur lui et, ainsi, de connaître la limite à la rupture de ce sol. C'est la raison pour laquelle on appelle également cette droite l'enveloppe des cercles à la rupture.

Un troisième terme apparaît dans la loi de Coulomb, il s'agit de σ' , **la contrainte effective**, qui est normale à la pente. C'est la contrainte correspondant aux efforts transmis par les grains du squelette minéral du sol, au niveau de leurs points de contact.

La contrainte effective est, d'après la loi de Terzaghi, la contrainte totale (σ) à laquelle on soustrait la contrainte neutre (u), soit la pression de l'eau remplissant les interstices du sol.

$$\text{Loi de Terzaghi : } \sigma' = \sigma - u$$

La quantité d'eau présente dans le sol, ainsi que des phénomènes de surpression qui peuvent, notamment, être induits par la présence d'un niveau imperméable (de lithologie différente ou gelé)



■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES

dans le sol ont une influence sur la contrainte effective. Lorsqu'elle diminue, la résistance au cisaillement devient moindre et, puisqu'il s'agit d'une force stabilisante, on peut assister au déclenchement d'instabilités.

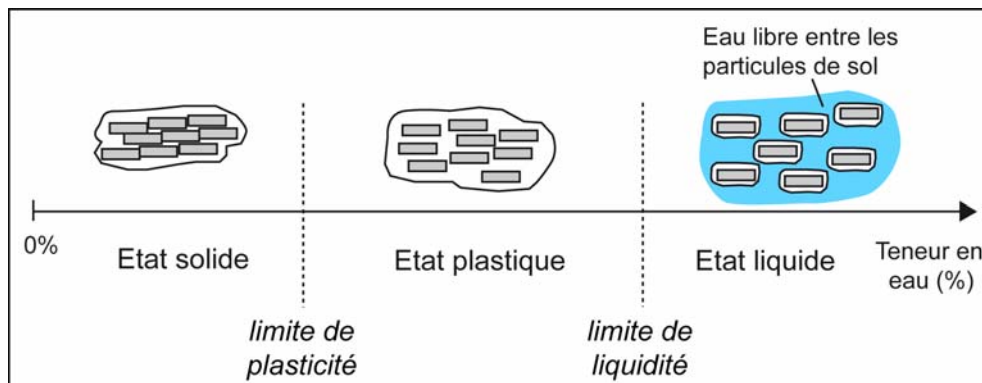


Fig. 1 – Limites de consistance d'un sol en fonction de sa teneur en eau (limites d'Atterberg). Dans un état plastique, le sol est stable naturellement mais, dès qu'un effort lui est appliqué, il est le siège de déformations importantes (pétrissage). Au-dessus de la limite de liquidité, le sol se comporte comme un liquide. Sa résistance au cisaillement est nulle et il se répand lorsqu'on le déverse.

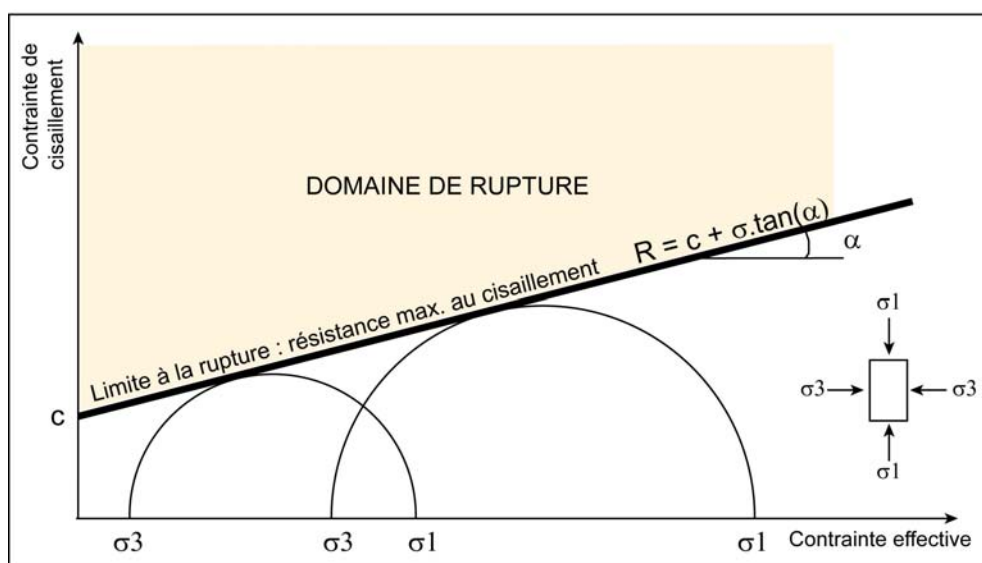


Fig. 2 – Représentation de la droite de Mohr-Coulomb.

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES

4.1.4 Propriétés physiques des sols et des roches (2/2)

b) Les roches :

Les propriétés d'un massif rocheux dépendent des **propriétés de la roche constitutive** (matrice, roche intacte), des **propriétés des discontinuités** (joints de stratification, fractures, diaclases, failles) (fig. 1) et enfin de l'**orientation et de la fréquence de ces discontinuités**.

Les roches sont beaucoup plus cohésives que les sols, mais il existe d'importantes différences entre les types de roches, par exemple entre un granite et de la craie. Le degré d'altération de la roche est un facteur à prendre en compte.

La cohésion est également fonction de la présence de discontinuités. En effet, ces discontinuités sont les points faibles d'une roche et en déterminent fortement la résistance au cisaillement.

Ainsi, lorsque des discontinuités sont présentes, la résistance au cisaillement d'une roche sera dépendante de la résistance au cisaillement des joints de ces discontinuités et non de celle de la matrice. Selon la rugosité des joints, la roche sera plus ou moins à même de résister au cisaillement. Dans le cas d'un joint lisse cette résistance est très faible contrairement au cas d'un joint rugueux.

La résistance d'un massif dépend, d'une part de la position des fissures (angle par rapport à la direction de la contrainte) et de la résistance au cisaillement de ces fissures, et, d'autre part, de la résistance propre de la roche (hors de la présence de fissures).

Comme dans les sols, les circulations d'eau au sein du massif ont une grande influence sur le bilan des forces dans le sol et, de fait, sur la stabilité des blocs rocheux. Pendant la saison froide, le gel des exutoires d'eau crée des surpressions dans le massif, ce qui peut entraîner une augmentation sensible des phénomènes d'instabilité.



Fig. 1 – Importante fracture dans la roche, détachant une partie de la masse rocheuse potentiellement instable.

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES

4.1.5 Mesures de protection face aux mouvements gravitaires

Il existe deux types de prévention qui sont applicable dans le cadre des dangers naturels et plus particulièrement des mouvements gravitaires : la prévention passive et la prévention active.

La **prévention passive** se fait par le biais de mesures de planification et d'aménagement du territoire pour une utilisation adéquate du territoire en évitant de construire dans des zones dangereuses. Plusieurs outils sont disponibles :

- Carte de phénomènes (aléas). Il est tout d'abord nécessaire d'identifier les dangers : que peut-il se produire et où ? L'analyse de la situation de danger permet d'établir la carte des phénomènes ou carte des aléas (fig. 1).
- Carte de dangers. Il s'agit d'une étape d'évaluation des dangers. La question est de savoir avec quelle fréquence et quelle intensité les phénomènes identifiés peuvent se produire. Cela conduit à la réalisation de la carte des dangers qui distingue cinq degrés de danger (fig.2 & 3).
- Restriction de construction. La carte de danger, présentant un zonage selon la dangerosité, permet de délimiter des zones interdites à la construction.
- Mesures de protection supplémentaires pour certaines constructions particulièrement sensibles comme les hôpitaux ou les écoles dont le fonctionnement doit pouvoir être garanti, même après un événement dommageable. Les constructions qui peuvent induire des dommages importants sont également soumises à des prescriptions spéciales. C'est, par exemple, le cas des centrales nucléaires, des stations d'épurations, raffineries, etc.
- Surveillance de sites dangereux avec des systèmes de monitoring et éventuellement d'alarme en cas de danger accru.

La **prévention active**, quant à elle, consiste en l'application de différentes mesures sur le terrain : on agit directement sur le phénomène pour essayer de l'empêcher.

- Contrôle de l'érosion : en pied de glissement par l'installation d'une digue de retenue, dans la pente par des traverses de bois, ou encore dans un torrent en installant des seuils qui vont casser l'énergie de l'eau et empêcher le surcreusement du lit du torrent et la mobilisation de matériel (fig. 4). La forêt joue un rôle important pour limiter l'érosion d'un versant (interception des précipitations par le couvert végétal et stabilisation par les racines) : forêt protectrice.
- Modification du profil du versant afin d'en assurer la stabilité : par exemple, reprofilage d'un talus pour en diminuer la pente (mais attention car cela pose des problèmes dans les zones habitées) ou encore, modification de la répartition des masses (excavation en tête et remblayage en pied de versant).
- Drainage la présence d'eau diminue fortement la cohésion d'un terrain, c'est pourquoi il peut être intéressant de drainer les terrains en mouvement. Il faut toutefois être particulièrement attentif à d'éventuels affaissements du terrain après le drainage qui peuvent rendre la situation encore plus dramatique.
- Ouvrages de protection qui doivent assurer la sauvegarde des biens et des personnes lors d'un mouvement gravitaire. Ce sont, par exemple, des galeries de protection (chute de pierres, avalanches), des filets de protection (chutes de pierres), la forêt protectrice (chutes de pierres, glissement de terrain, avalanches, laves torrentielles), des digues et fossés dans les torrents (laves torrentielles) (fig.5) ou encore des digues de retenue pour les avalanches (fig.6).
- Ancrages sont des structures métalliques comparables à des clous que l'on va insérer dans un terrain en glissement afin de le stabiliser en augmentant la résistance au cisaillement.



■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES

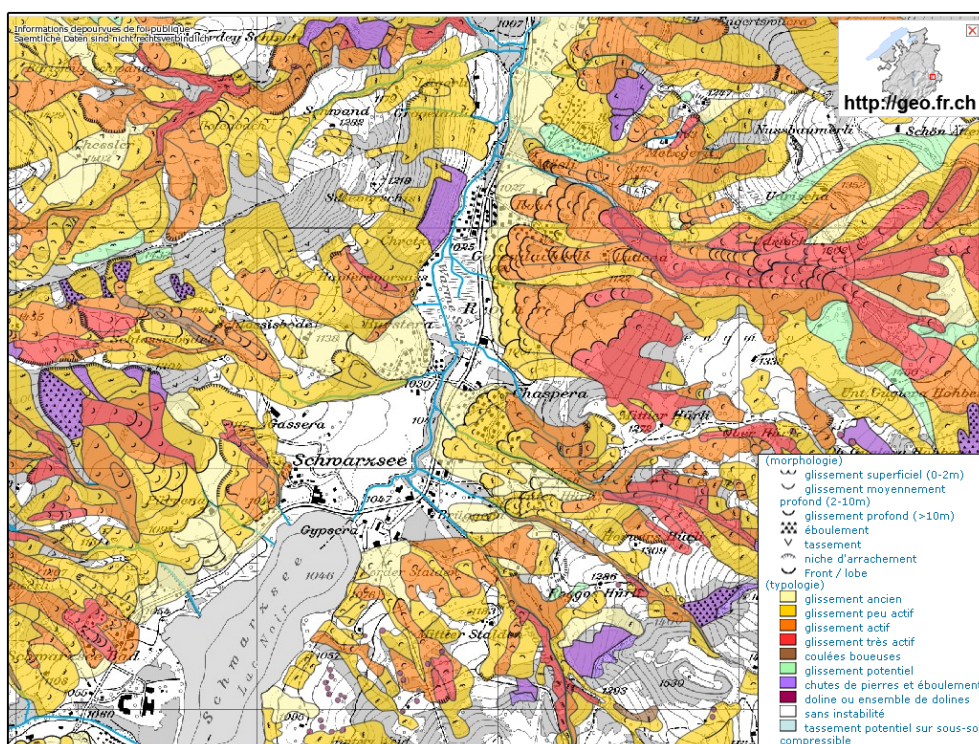


Fig. 1 – Carte des phénomènes (morphologie et typologie des glissements de terrain) de la région du Lac Noir (Préalpes fribourgeoises) (source : guichet cartographique du canton de Fribourg, <http://geo.fr.ch>).

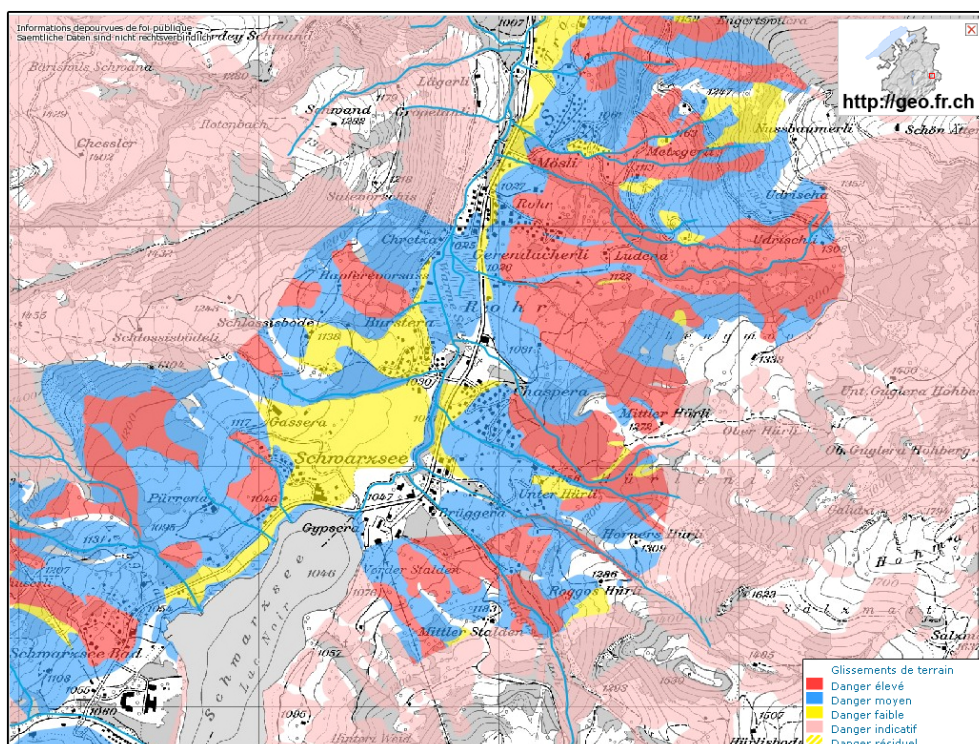


Fig. 2 – Carte des dangers (glissements de terrain) de la région du Lac Noir (Préalpes fribourgeoises) (source : guichet cartographique du canton de Fribourg, <http://geo.fr.ch>).

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES

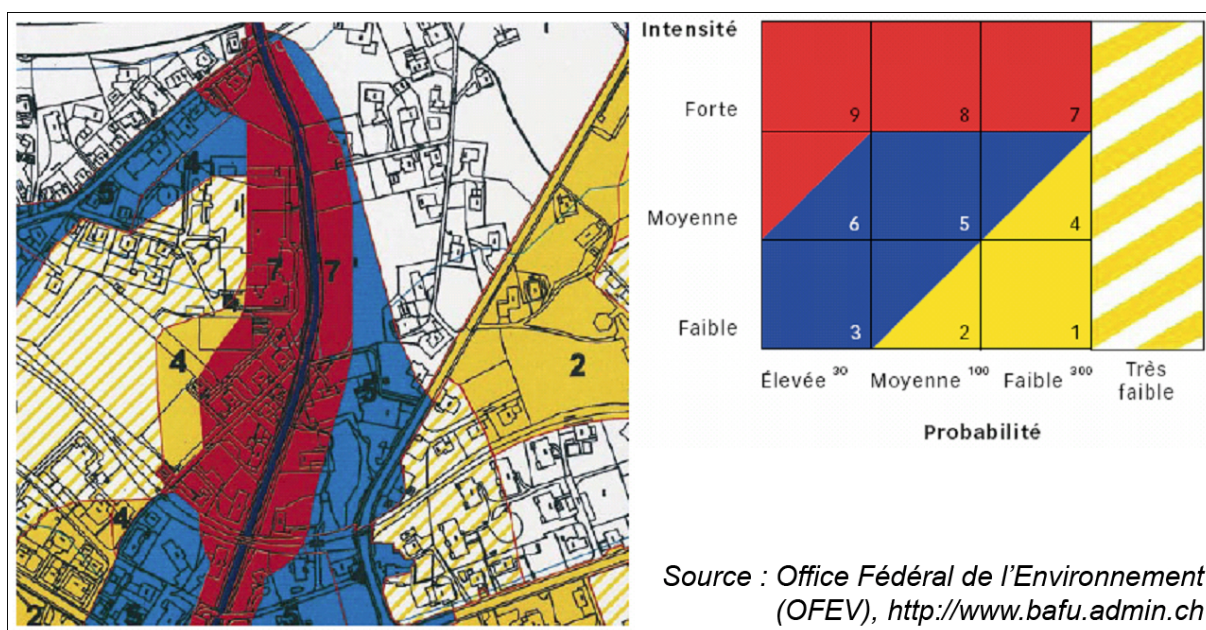


Fig. 3 – Exemple de zonage par la carte de danger et degrés de dangers (source : OFEV).



Fig. 4 – Seuils artificiels dans un torrent (Fribourg).

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES



Fig. 5 – Ouvrage de protection à effet “brise-lave” contre les laves torrentielles (Villeneuve, VD).



Fig. 6 – Digues de protection contre les avalanches (Zinal, VS).

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES

4.2.1 Classification des mouvements gravitaires

Classer les mouvements gravitaires est rapidement devenu une nécessité, ne serait-ce que pour la communication, pour être sûr de parler de la même chose. En plus, une description systématique des mouvements gravitaires permet de lister les éléments à prendre en compte et d'avoir les données appropriées lorsqu'il s'agit de délimiter les zones qui pourraient potentiellement être touchées et pour concevoir des mesures de protection adaptées.

Il existe une **multitude de classifications possibles de mouvements gravitaires** : selon le mode de mouvement (chute, glissement, écoulement, transposition) (fig.1), la nature du mouvement (solide, plastique, visqueux), l'humidité, la vitesse, la nature des matériaux impliqués (bedrock, sol, matériaux non consolidés...) ou encore la combinaison avec d'autres agents (vent, eau, neige...).

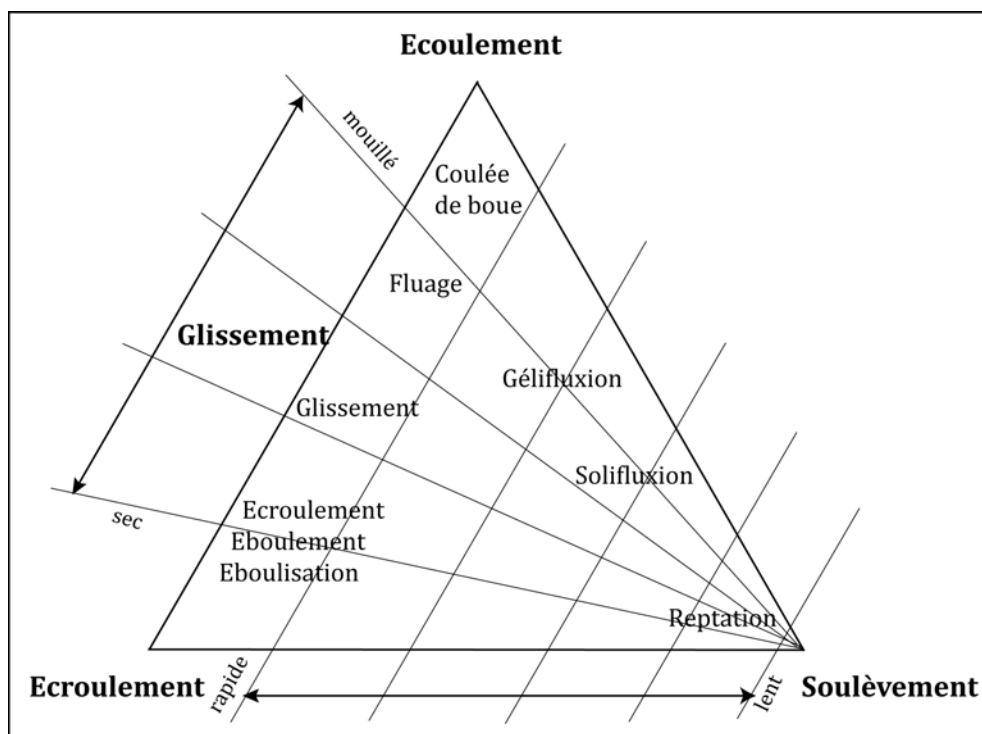


Fig.1 – Classification selon le type de mouvement (modifié d'après Zepp 2002).

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES

4.2.2 Les déplacements sans rupture réelle

Phénomènes de reptation ou creeping

Les phénomènes de reptation recouvrent les phénomènes de déformation lente (quelques mm/an, voire cm/an) de la couche superficielle du sol et de formations meubles qui, lorsqu'elle est gorgée d'eau, devient plastique. Des lobes et coulées se forment dans les pentes.

Les phénomènes de reptation consistent, en réalité, en une succession de petits déplacements de quelques centimètres. De grandes surfaces, voire des versants entiers peuvent en être affectés. On les identifie dans le paysage à leur topographie bosselée (**les terrassettes ou pieds de vaches**) (fig.1).

Des cas particuliers de reptation sont la **gélifluxion** et la **solifluxion** dans lesquels un niveau imperméable (qui peut être gelé ou bien, par exemple, argileux) joue le rôle d'un plan de glissement. Le terrain affecté est, là encore, gorgé d'eau (fig.2 et 3).

La gélifluxion est une forme de solifluxion qui est liée aux cycles de gel-dégel. L'eau provient vraisemblablement de la fonte du manteau neigeux ou de la fonte de lentilles de glaces qui se seraient formées durant les mois de gel (cf. fiches 3.2.4).

Ces deux phénomènes sont assez difficiles à distinguer et l'on n'en connaît pas encore bien le fonctionnement. On privilégie le terme de solifluxion lorsque le terrain impliqué est un sol, où la végétation est présente. Le terme de gélifluxion s'appliquera plus facilement dans le cas de formations poreuses plus grossières.

Les phénomènes de reptation peuvent aussi s'exercer sur des blocs qui, à chaque cycle gel/dégel, se déplacent de quelques cm vers le bas de la pente. La reptation est amplifiée par le poids du bloc. Ces blocs que l'on appelle **blocs laboureurs** sont reconnaissables à leur bourrelet frontal et au sillon qu'ils laissent derrière eux (fig. 4).

Reptation profonde liée au permafrost

Dans les zones où les températures moyennes annuelles de l'air et du sol le permettent, on peut voir se développer du pergélisol (cf. chapitre 3). Selon le degré d'inclination des terrains concernés, des phénomènes de reptation profonde peuvent se produire, notamment dans les terrains sédimentaires meubles où la teneur en glace est suffisamment importante. Il s'agit d'un déplacement lent **par déformation des sédiments sursaturés en glace** qui peut aller de quelques dizaines de centimètres à plusieurs mètres par an.

La forme la plus marquante de cette reptation profonde est le glacier rocheux (fig. 5) (cf. fiche 3.4.1 et suivantes). Mais la reptation profonde se manifeste aussi par des formes de plus petite taille comme les éboulis fluants et les protalus ramparts (glaciers rocheux embryonnaires) (fig. 6).

Fauchage

Le fauchage est un phénomène de basculement vers l'aval des têtes de couches rocheuses en place sous l'effet de la gravité. Ce sont surtout les formations litées, schisteuses et montrant une structure en colonnes séparées par des discontinuités avec un pendage important (inclinées ou subverticales) qui sont affectées (fig. 7).



■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES



Fig.1 – Pieds de vaches (Fribourg).

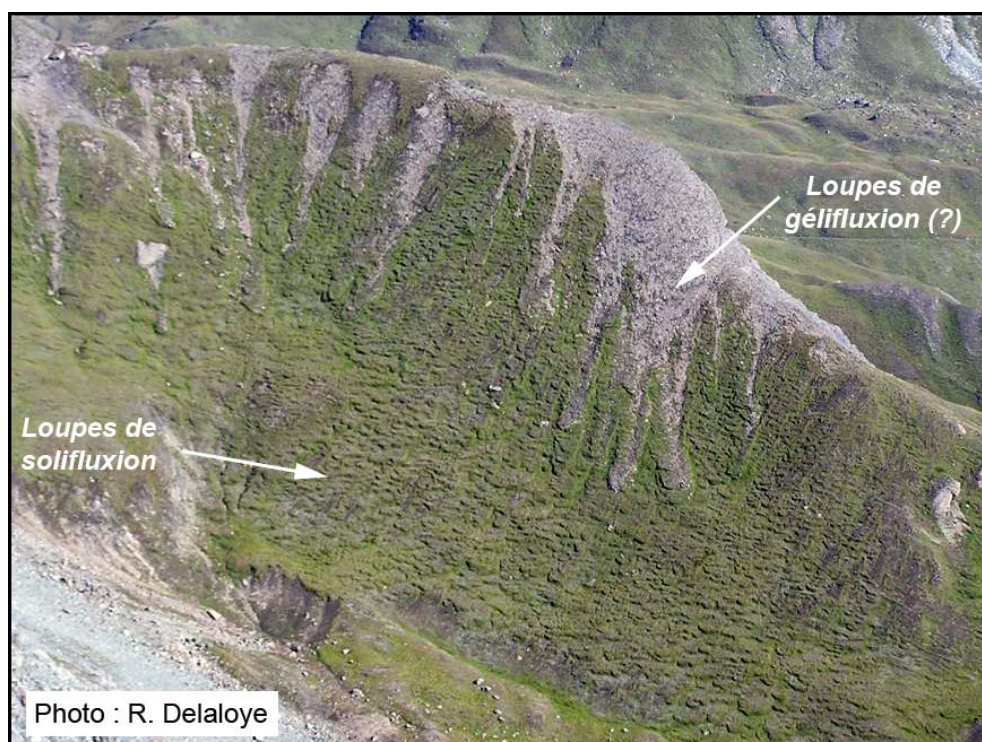


Fig. 2 – Loupes de solifluxion et de gélifluxion (Tsaté/Moiry, VS).

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES



Fig. 3 – Grandes loupes de solifluxion (versant est du Horlini, VS).

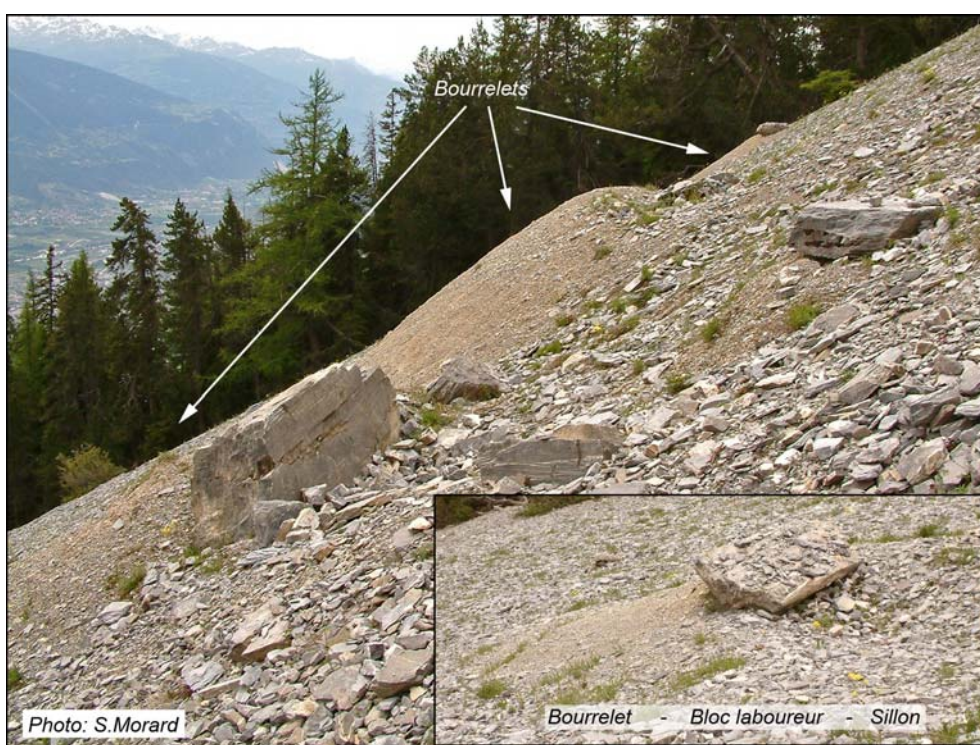


Fig. 4 – Comme des bulldozers, les blocs laboureurs ont formé d'impressionnants bourrelets de matériaux fins contrastant avec les blocs calcaires de la surface de l'éboulis (Flottuwald, VS).

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES

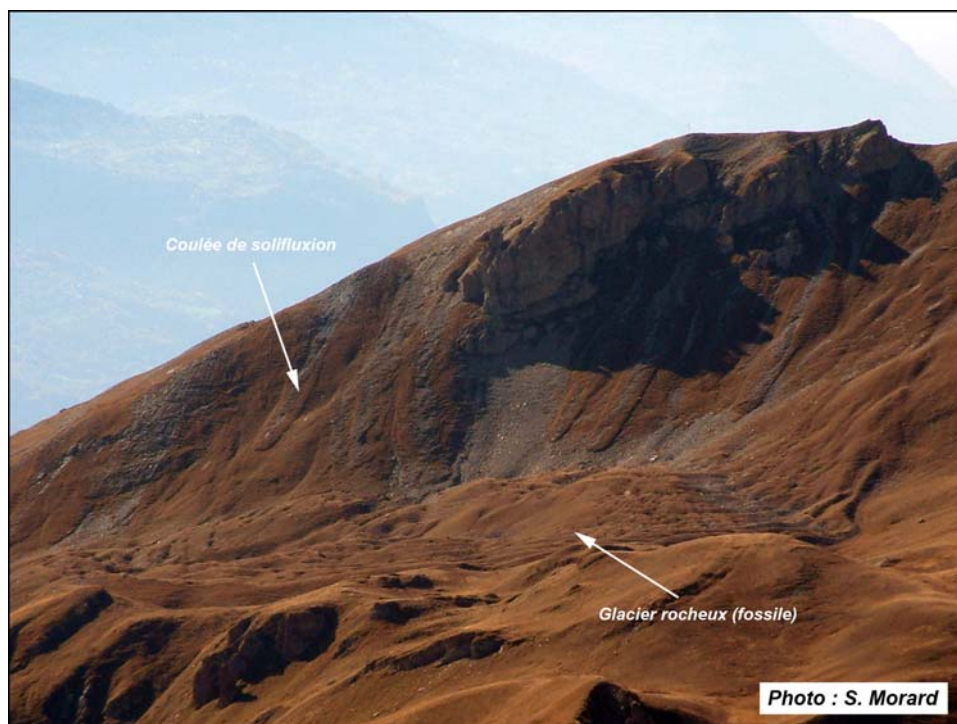


Fig. 5 – Différentes formes de flux affectent (ou ont affecté) le versant est du Horlini (VS) : glacier rocheux fossile et loupes de solifluxion.



Fig. 6 – “Jeune” protalus rampart au pied des Becs-de-Bosson (Vallon de Réchy, VS). Lors du Petit Age Glaciaire, un glacier tempéré recouvrait cette zone, empêchant le développement d'un pergélisol. La formation de ce glacier rocheux embryonnaire a donc très certainement débuté dans le courant du 20^{ème} siècle (cf. fiche 3.4.8).

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES

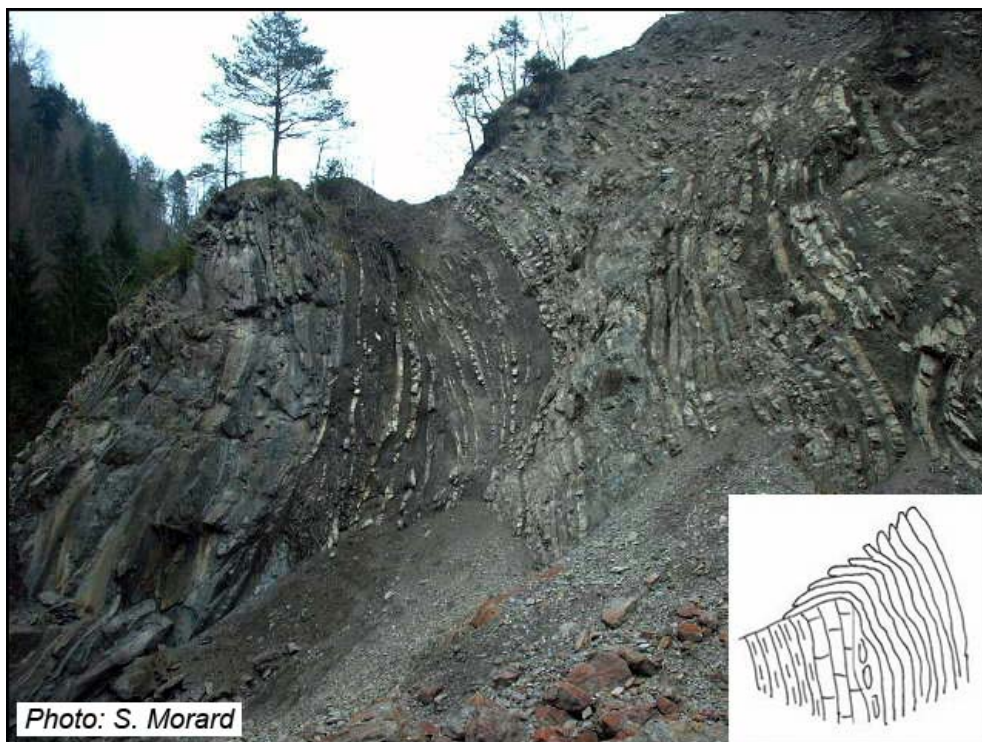


Fig. 7 – Fauchage dans la vallée de la Jogne (Broc, FR).

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES

4.2.3 Les déplacements avec ruptures : les chutes

Les chutes de pierres ou de masses rocheuses de petite taille sont assez fréquentes (fig.1). Elles se produisent sous l'action de la gravité et de l'altération d'une paroi rocheuse par différents agents d'érosion (entre autres, les alternances gel/dégel, l'action des végétaux).

Les chutes régulières de pierres mènent à la formation d'**éboulis** – accumulations du matériel détaché de la paroi sommitale. Les éboulis peuvent former des cônes bien définis (fig.2) ou des tabliers d'éboulis (aussi appelés voiles d'éboulis) (fig.3) quand le matériel est réparti sur tout un versant sans forme particulière.

Généralement, un éboulis présente une forme convexe avec une pente moyenne de 35°. On y observe un granoclassement du matériel : si les débris de petite taille s'arrêtent rapidement quand la pente diminue, ce n'est pas le cas des blocs plus importants qui ont tendance à aller plus loin puisque leur énergie cinétique est plus élevée. Un **versant réglé** est un versant qui a vu l'érosion complète de sa paroi sommitale.

Eboulement et écoulement

Eboulements et écoulement sont des événements instantanés qui se déroulent en l'espace de quelques secondes à quelques minutes. Il s'agit, dans les deux cas de la chute d'une masse rocheuse d'un volume important pouvant représenter jusqu'à plusieurs millions de m³ de matériel (fig.4).

Prévoir un tel événement est quasiment impossible, néanmoins, on peut voir dans l'intensification de la fréquence des chutes de pierres et de blocs dans une paroi, des signes annonciateurs.

La distinction entre éboulement et écoulement n'est pas toujours claire. On peut se baser sur le volume : on parlera ainsi d'éboulement pour la chute d'une masse rocheuse à partir de 100m³ jusqu'à 100'000 m³ au-delà, on parle d'écroulement. La distance d'épandage peut également permettre de trancher entre éboulement et écoulement. Si cette distance d'épandage est importante par rapport à la hauteur de chute, on privilégiera la notion d'écroulement.

On distingue deux types principaux de rupture pour les éboulements et écoulements: a) la rupture de tout un pan de paroi, comme, par exemple, l'écroulement de Randa en 1991 (fig.5) ou les éboulements successifs à Derborence en 1714 et 1749 ; b) le « glissement plan » le long d'un plan de stratification de la roche comme à Goldau en 1906 ou lors du grand éboulement tardiglaciaire de Sierre (fig.6).

Effondrement glaciaire

On parle d'effondrement glaciaire pour désigner un cas de rupture d'un volume important d'un glacier. Dans des cas extrêmes, c'est l'ensemble de la langue terminale du glacier qui peut se détacher. Lorsqu'un effondrement glaciaire se produit en hiver sur des accumulations de neige en contrebas, on peut voir se développer des avalanches de neige/glace particulièrement importantes. L'effondrement glaciaire de l'Altels en 1895 demeure un cas d'école (figs.7 et 8). La rupture de la langue terminale du glacier de l'Allalin (vallée de Saas) en 1965 causa la mort de 88 ouvriers lors de la construction du barrage de Mattmark (cf. fiche 2.6.2).

Avalanche roche-glace

Lorsqu'un pan de paroi rocheuse (accompagné éventuellement d'une partie de glacier) se décroche et chute sur un glacier situé en contrebas, ce même glacier peut être emporté. L'énergie cinétique développée est alors considérable et il s'en suit une gigantesque avalanche, voire une coulée boueuse qui peut atteindre des vitesses extrêmement rapides (>300 km/h). Quelques exemples : Fletschhorn en 1903, Mt. Cook (Nouvelle-Zélande) en 1991, Brenva (Mont-Blanc) en 1920 et 1998. Aux Dents-du-Midi en 1835, à Huascaran (Pérou) en 1962 et 1970 et à Kolka-Kamandon (Caucase, Ossétie) en 2002 (fig.9), des coulées boueuses particulièrement importantes se sont produites.



■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES

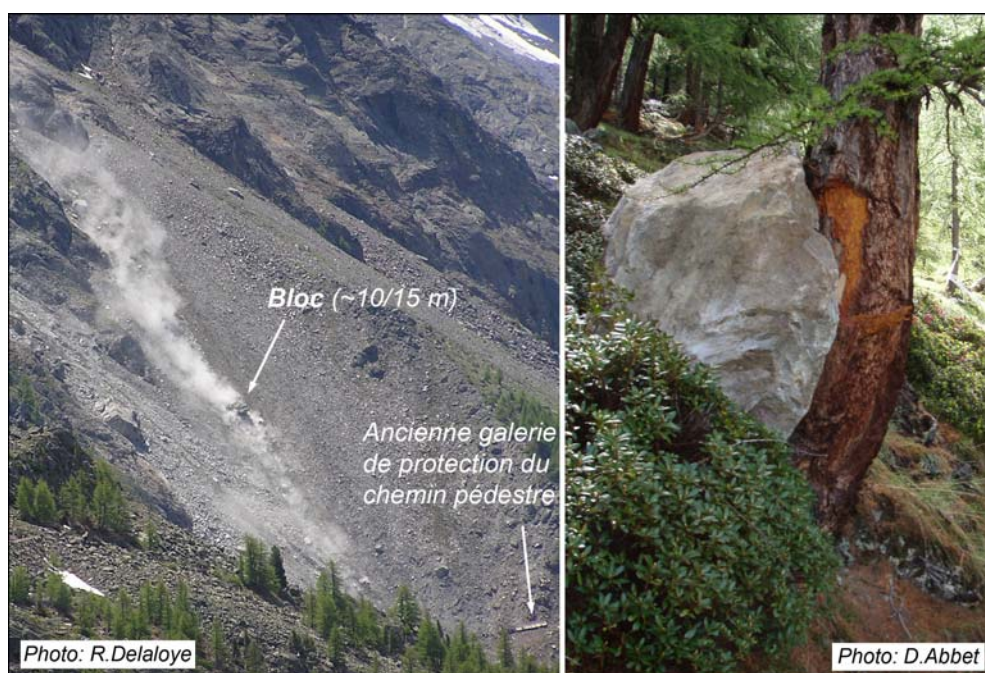


Fig. 1 – Chute d'un gros bloc (à g.) et impact de chutes de pierres (à d.) (Alpes valaisannes).



Fig. 2 – Cône d'éboulis de la Pierreuse (Château-d'Oex, VD).

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES



Fig. 3 – Voiles d'éboulis calcaires du Mont-d'Or (Col des Mosses, VD).



Fig. 4 – Eboulement, Dent de Lys (FR).

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES



Fig. 5 – Exemple d'une rupture d'un pan de paroi : l'éroulement de Randa (VS) de 1991 (vol. 30 mio de m³).

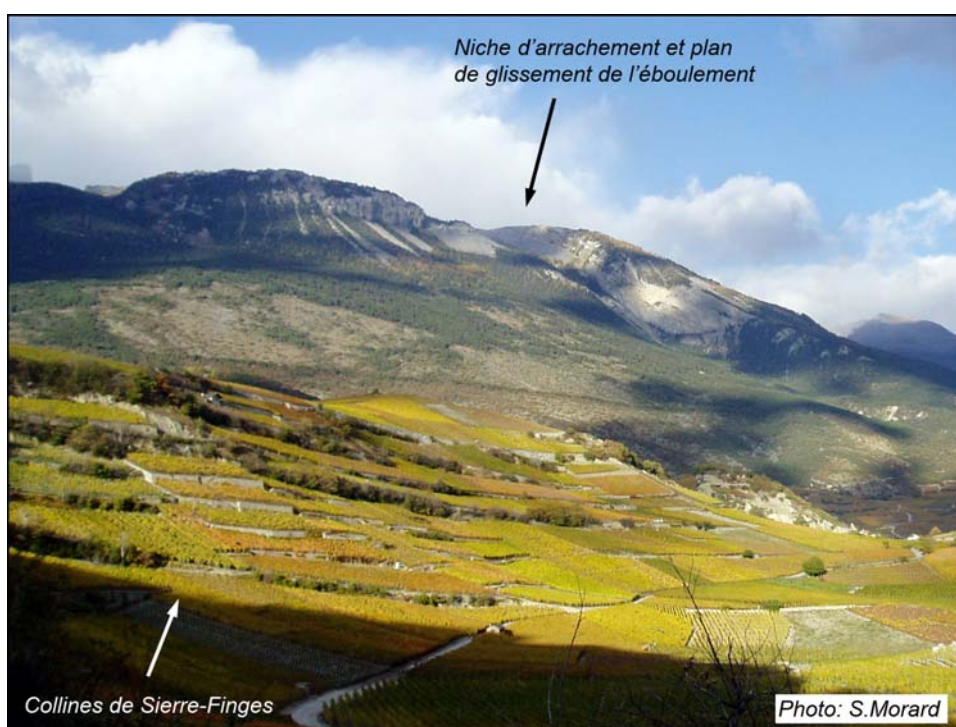


Fig. 6 – L'éboulement tardiglaciaire de Sierre (volume de 2 km³) : la dalle calcaire de la Flottuwald à la pente très régulière représente le plan de glissement de l'éboulement. Au premier plan, on distingue les grandes collines des Bernunes dépôt de la masse éboulée, qui s'étale de Salquenen à Grône, 13 km en aval.

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES



Fig. 7 – L'Altels (3'536 m.) après l'effondrement glaciaire (à g.) et aujourd'hui (à d.).

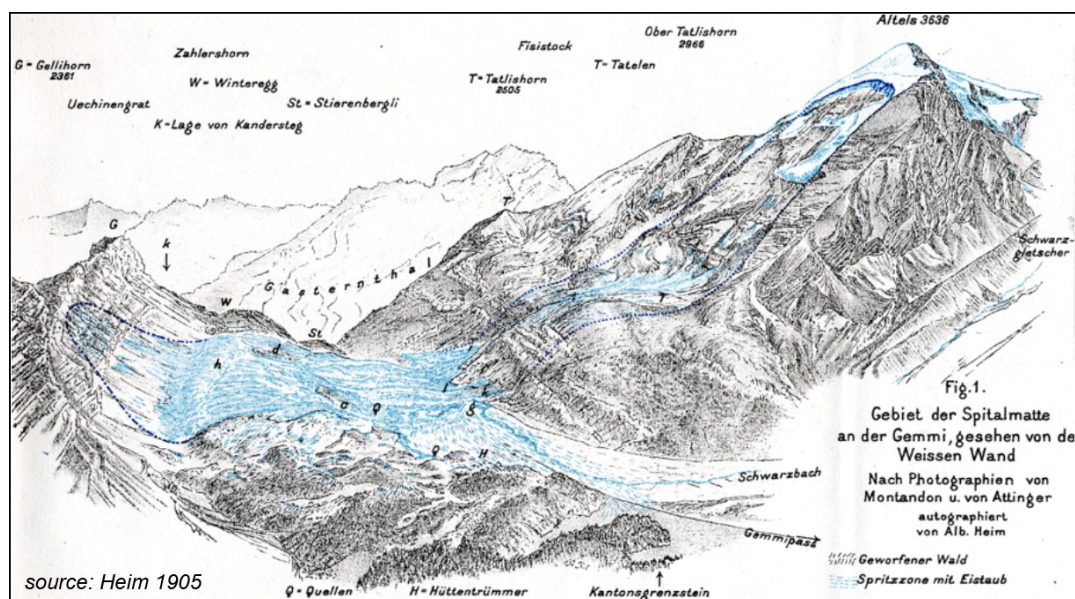


Fig. 8 – Représentation de l'effondrement du glacier de l'Altels en 1895.

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES

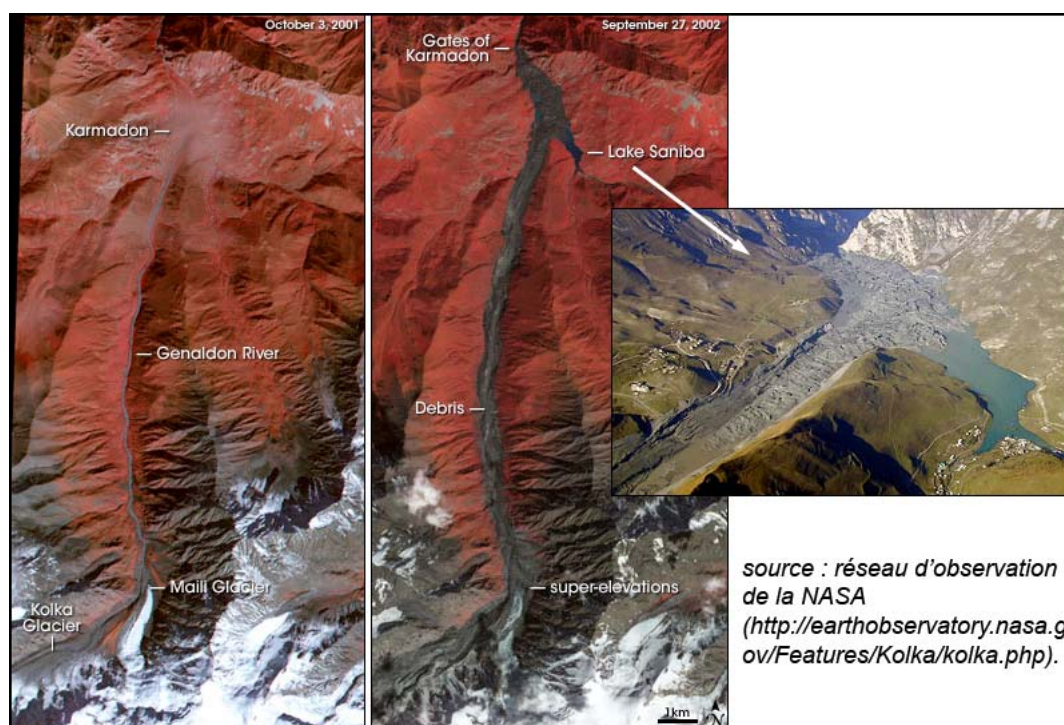


Fig. 9 – “Ice-rock avalanche” de Kolka – Karmadon (Caucase). Altitude de la zone de départ : 5'000m.

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES

4.2.4 Les glissements (1/2)

Un glissement de terrain est un mouvement gravitaire lors duquel une partie du matériel d'un versant (masse rocheuse ou terrain meuble) se déplace vers l'aval, **le long d'un plan de glissement**. Arbres tordus, inclinés ou arrachés, bâtiments fissurés ou encore routes ou sentiers déformés constituent de bons indicateurs de l'activité d'un glissement de terrain (fig.1).

Un glissement se déclenche lorsque les forces motrices (la gravité) dépassent les forces stabilisantes que sont la résistance au cisaillement et le poids du pied du versant. Dans un terrain incliné, la cause peut être, par exemple, des surpressions dues à l'eau (pluies intenses et/ou sur une longue période, fonte des neiges, etc.), une surcharge dans le versant, ou encore une diminution de l'effet de contrepois du pied de versant (érosion par un cours d'eau ou aménagement anthropique).

Il faut souligner **l'importance du rôle de l'eau** dans les glissements de terrain. Sa présence au niveau de la surface de glissement semble être un facteur clef du processus de glissement. En outre, un sol dont la teneur en eau dépasse un certain seuil a une cohésion entre les grains réduite, voire nulle.

Glissement rotationnel

La géométrie classique d'un glissement rotationnel est illustrée par la figure 2. La surface de glissement est de forme circulaire, concave. La zone de départ du glissement est caractérisée par une brusque rupture de pente (**escarpement de départ**) et par la présence de fissures et éventuellement d'une morphologie en gradins (avec un ou plusieurs compartiments) (fig.3). La surface même du glissement présente une **topographie bosselée** caractéristique. Dans la partie aval, on retrouve une morphologie en bourrelet : le pied du glissement. La masse de terrain descendue subit des contraintes de compression importantes et est fortement déstructurée. Lorsqu'il y a une forte teneur en eau, la limite de liquidité peut rapidement être atteinte et on peut voir le glissement évoluer en une coulée boueuse.

Les dimensions des glissements rotationnels varient de quelques mètres à plusieurs kilomètres de long et de quelques dm à plusieurs dizaines voire centaines de mètre d'épaisseur. En effet un glissement rotationnel peut affecter un simple talus routier (fig.4) ou un versant dans son entier (fig.5). Les petits glissements superficiels peuvent être assez rapides (m/s) mais se produisent sur un court laps de temps. Par contre les glissements plus importants sont souvent assez lents (cm/an - m/an) mais leur vitesse peut aller jusqu'à plusieurs mètres par jour en période de crise. En outre leur activité se poursuit sur plusieurs années voire plus.



■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES



Photo : S.Morard

Fig. 1 – Arbres déracinés suite à l'activation d'un glissement de terrain. La zone de départ du glissement est visible sur la droite de la photo (Hohberg, FR).

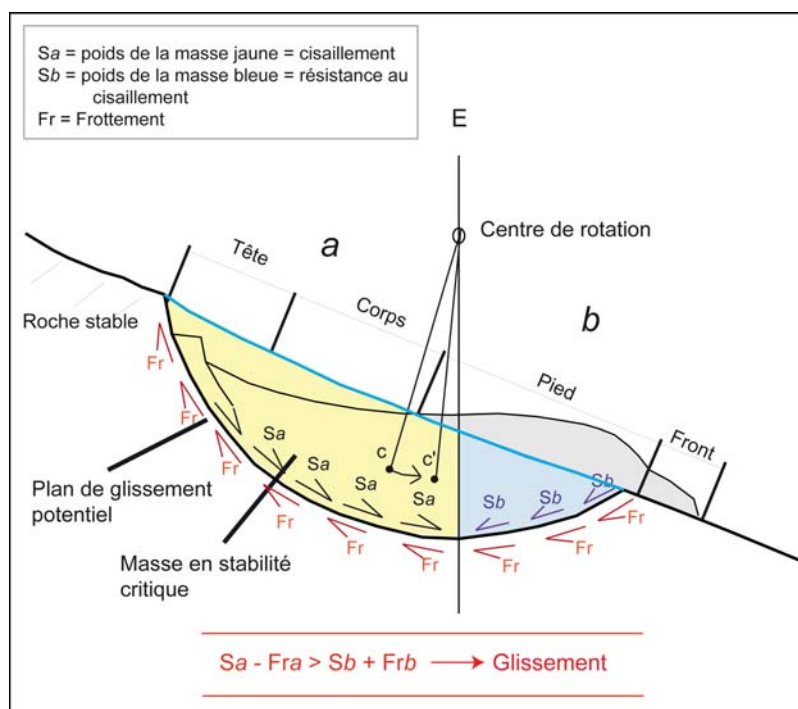


Fig. 2 – Coupe schématique d'un glissement rotationnel et distribution des forces. Le poids du corps du glissement (Sb) et le frottement (Fr) s'opposent à la mise en mouvement (forces stabilisatrices) tandis que le poids de la tête (Sa) exerce une action motrice. Si $Sa - Fra > Sb + Frb$ alors il y a glissement, sinon la masse est stable. Les infiltrations d'eau (pluie, fonte des neiges) ont un effet négatif sur la cohésion du terrain et contribuent à accentuer l'activité du glissement.

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES



Fig. 3 – Niche d'arrachement du glissement de l'Harmalière, Isère.



Fig. 4 – Glissement rotationnel en bordure d'une terrasse alluviale (Marly, FR).

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES



Fig. 5 – Bourrelets frontaux d'un glissement rotationnel étendu (Estavannens, Préalpes fribourgeoises).

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES

4.2.5 Les glissements (2/2)

Glissement plan

Dans le cas des glissements plan ou translationnels, la surface de glissement est plane. Des couches ou des ensembles de couches de terrain se mettent en mouvement le long d'une couche plus faible ou d'une discontinuité lithologique ou structurale. Un niveau marneux ou argileux est un exemple fréquent de couche plus faible. Une morphologie en dip-slope (lorsque le pendage des couches est très proche de l'inclinaison du versant) est également favorable à l'occurrence d'un glissement translationnel.

Par rapport au glissement rotationnel, il y a mise en mouvement dès lors que le poids de la masse instable dépasse les forces de friction. Si $Sa - Fra > 0$ alors il y a glissement, sinon la masse est stable.

Les surfaces affectées par un glissement plan peuvent s'étendre sur plusieurs km². Un glissement plan peut être extrêmement rapide (instantané), à l'exemple des événements de Arth-Goldau (1806) ou du Vaiont (Italie, 1964). A noter que ce type de mouvement gravitaire se produit souvent dans les flyschs et les schistes marneux.

Un exemple fameux : **Falli Hölli** (Préalpes fribourgeoises) (fig.1). Entre avril et août 1994, la brusque (ré)activation d'un grand glissement de terrain (plusieurs dizaines de mètres par jour !) a complètement détruit le village de vacances de Falli Hölli. Les fortes précipitations de juin 1993 à mai 1994 (700mm de plus que la normale) seraient la principale cause de cet événement.

Tassement de versant

Le tassement est un enfoncement de matériaux relativement rigides dans un encaissant plus tendre (figs. 2 et 3). Le tassement peut évoluer soit évoluer en éboulement (brutal), soit en glissement de terrain (lent), ou encore en basculement et enfoncement (par ex. Eiger 2006, cf. fiche 2.6.4). Les vitesses sont généralement lentes (mm/an à dm/an). Ses dimensions vont du bloc au versant entier (fig. 3). Les tassements de versant sont fréquents dans les vallées alpines. Suite au retrait des grands glaciers à la fin de la dernière grande glaciation, les versants des vallées alpines qui s'appuyaient sur ces masses de glace se sont trouvés profondément déstabilisés. Suite à cette décompression, de nombreux versants se sont tassés dans les Alpes sous l'effet de la gravité.



■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES

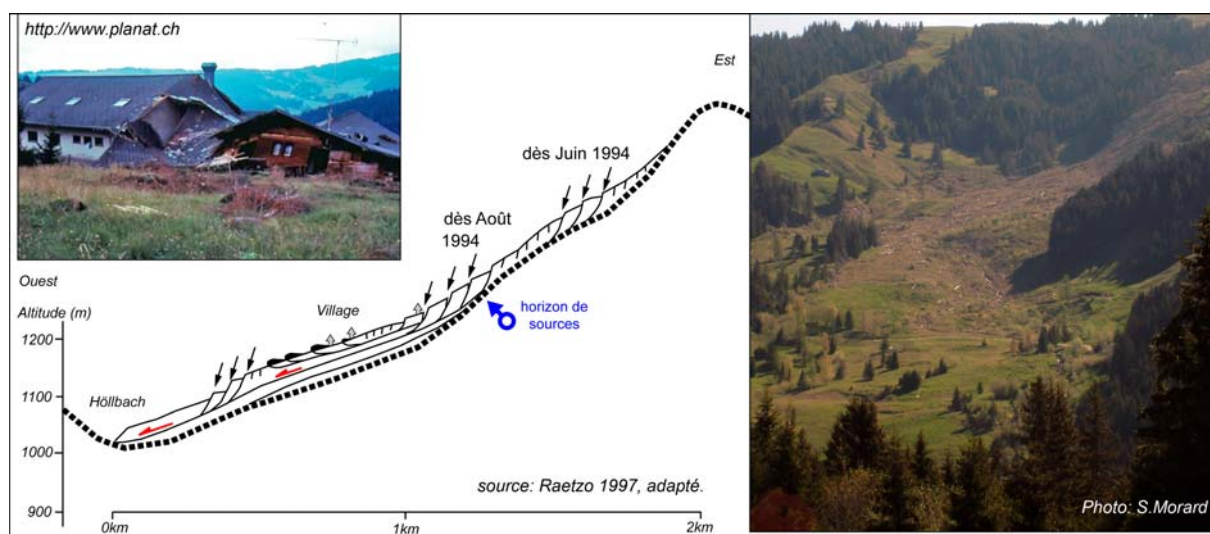


Fig. 1 – Le glissement translationnel de Falli Hölli (déplacement de 200m en 4 mois, volume 33 mio. m³).



Fig. 2 – Tassement évoluant en basculement (Derborence, VS).

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES



Fig. 3 – Démantèlement des assises rocheuses dû au tassement d'un versant (Mattertal, VS).



Fig. 4 – Imposant tassement post-glaciaire du versant de l'Ergischhorn ayant formé les terrasses du village de Ergisch et du hameau de Obermatte (VS).

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES

4.2.6 Les mouvements fluides

Les laves torrentielles et coulées de boue sont la conséquence d'une mise en mouvement, sous d'un terrain saturé en eau ayant atteint sa limite de liquidité (cf. limites d'Atterberg, fiche 4.1.3). Il s'agit d'une boue – résultant du mélange en différentes proportions d'eau, de particules fines et de matériel plus grossier – qui s'écoule vers l'aval.

Les **coulées de boue (ou coulées boueuses)** se déclenchent en pleine pente, sans existence préalable d'un chenal. Elles se produisent souvent suite à un glissement de terrain, à partir du matériel glissé que des apports d'eau (pluie, fonte de neige) peuvent avoir détrempés jusqu'à que soit atteinte la limite de liquidité (fig.1).

Les **laves torrentielles** se produisent dans un chenal préexistant (ravine, torrent) et avec une inclinaison assez importante. Elle se compose d'un mélange relativement inhomogène de matériel solide (fines et blocs) et d'eau (fig.2). L'eau et les sédiments fins (fines et argiles) constituent une **boue d'une densité élevée** (1.8 à 2 t/m³). Du fait de sa densité importante, ce fluide visqueux est capable d'entraîner une grande quantité de matériel solide, dont des blocs de plusieurs tonnes (fig.3). Les gros blocs sont majoritairement transportés à l'avant de la coulée (le front) ; ainsi que (dans une moindre mesure) sur les côtés, dans ce que l'on appelle les bourrelets latéraux. Le corps de la lave torrentielle est un mélange plutôt homogène qui constitue l'essentiel du volume total de la lave. Des gros blocs peuvent y être transportés en surface. La queue est généralement plus fluide que le reste (écoulement hyperconcentré) et possède un potentiel érosif très important. Les figures 4 à 6 illustrent un chenal après le passage d'une lave torrentielle.

Le déclenchement d'une lave torrentielle est **lié à des apports d'eau important** dans le lit de torrents (pluies intenses (plus de 50-70 mm/h), fonte de neiges) combinés avec la présence d'une grande quantités de matériaux aisément mobilisables. Le torrent en crue arrache des matériaux des berges et de son lit et, le flux devient un mélange visqueux avec une action érosive de plus en plus importante. La lave torrentielle s'alimente ainsi tout au long de son parcours, pouvant entailler le lit du torrent sur plusieurs mètres (fig. 4). Le frottement sur les cotés de la lave torrentielle étant plus importants, il y a également un dépôt de sédiments transportés sous forme de **levées** (figs. 7 et 8).

La lave torrentielle va se stopper lorsque la pente ne sera plus suffisante (fig. 8) et/ou lorsque la teneur en eau ne permettra plus le transport du matériel en suspension.

Les laves torrentielles peuvent atteindre des vitesses supérieures à 10m/s et arrachent sur leur passage arbres, pans entiers de versant et blocs de très grande taille. La quantité de matériel transporté, la densité et la vitesse de déplacement des laves torrentielle en fait des événements particulièrement destructeurs, d'autant qu'il s'agit de phénomène instantanés, extrêmement difficiles à prévoir.

Un **lahar** est un cas particulier de lave torrentielle impliquant des matériaux d'origine volcanique (cendres et tephres). Ils sont constitués d'un mélange de cendres, tephres et d'eau, ainsi que de différents matériaux (arbres, constructions, etc.) arrachés durant l'écoulement. Les lahars se déclenchent généralement lors de fortes précipitations sur des dépôts volcaniques non consolidés comme les cendres. Dans certains cas, l'eau peut provenir de la fusion de la neige ou de la glace recouvrant le volcan qui entre en activité. Selon l'ancienneté des dépôts volcaniques concernés, les lahars peuvent avoir une température plus ou moins élevée.

Les lahars sont particulièrement destructeurs de par la vitesse et la densité des coulées qui ont un important pouvoir érosif. En outre, le risque de déclenchement d'un lahar reste important pendant de longues périodes après l'éruption, puisque les cendres déposées ne se solidifient pas. A titre d'exemple, on peut citer le lahar qui a détruit la ville d'Armero en Colombie, en novembre 1985. L'éruption volcanique du Nevado del Ruiz ayant entraîné la fonte d'une grande quantité de neige et de glace est à l'origine de ce lahar dévastateur (23'000 victimes).



■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES



Fig. 1 – Glissement rotationnel rapide évoluant en coulée boueuse (Col de la Croix, VD).

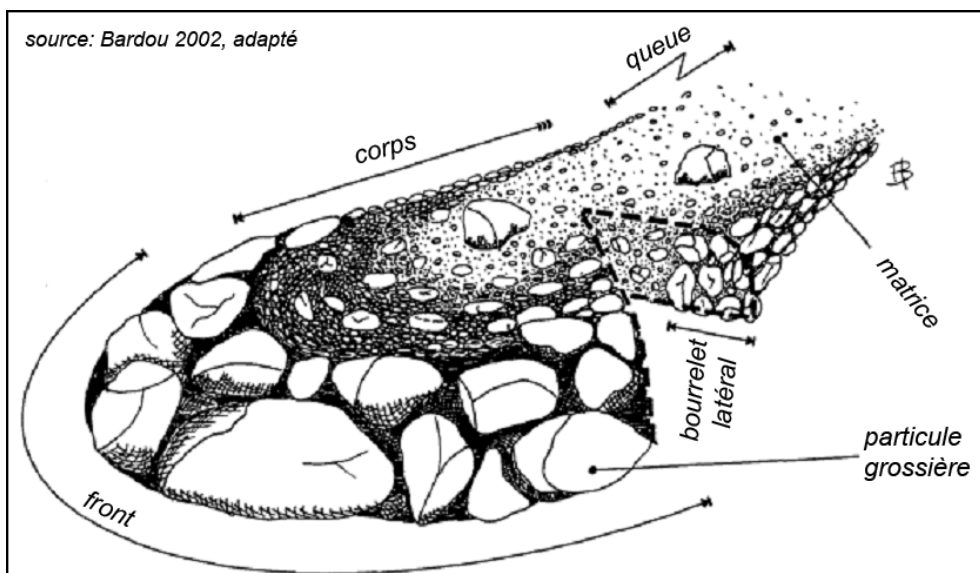


Fig. 2 – Morphologie et terminologie d'une lave torrentielle (adapté de Bardou 2002).

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES



Fig. 3 – Passage d'une importante lave torrentielle dans le chenal de l'Illgraben (VS) le 28 juin 2000. Le chenal mesure environ de 20m de large et le mur 6m de haut. Entre la première et la quatrième image, il ne s'est écoulé que 8 secondes ! Notez la taille des blocs transportés (source : <http://www.wsl.ch>).



Fig. 4 – L'Illbach (VS) est un tout petit torrent, mais chaque année il crache en moyenne 250'000 m³ de boue, de cailloux et de blocs de taille parfois impressionnante (notez le bloc sous le pont bouthanais). L'entaille profonde du lit du torrent au centre de l'image est consécutive à un unique événement majeur de lave torrentielle.

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES



Fig. 5 – Chenal après le passage de la lave torrentielle du Durnand en juillet 2006 (VS). Notez la hauteur limite du dépôt de boue sur le tronc d'arbre.



Fig. 6 – Les matériaux transportés par la lave torrentielle du Durnand (volume de 35'000 m³) le 25 juillet 2006 à 19h30 ont obstrué le cours d'eau de la Dranse à l'endroit où une passerelle la franchit. A l'aval, la lave torrentielle a arraché le pont ferroviaire et les rails du train, faisant également dérailler le train qui s'apprêtait à franchir le pont.

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES



Fig. 7 – Lave torrentielle avec levées (VS).



Fig. 8 – Laves torrentielles affectant des voiles d'éboulis (Lenzerheide, GR). On distingue le chenal d'érosion, les levées ainsi que les zones de dépôt.

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES

4.2.7 Avalanches et reptation nivale

La neige, mélange de glace, d'air et de vapeur d'eau, est un matériau qui évolue au cours du temps. Au printemps, le manteau neigeux humidifié et lourd peut glisser lentement sous l'action de son poids. On parle alors de **reptation nivale** dont la vitesse est de l'ordre du mm/an au cm/an. On peut voir des bourrelets et des formes arrondies se développer sur la neige dans les zones inclinées (fig.). La reptation de la neige peut avoir pour effets l'arrachement de matériaux du versant, le lissage ("raclage") des versants (fig.2) ou encore la formation de griffures dans la pente (fig.3).

Une **avalanche** est un mouvement gravitaire rapide (plus de 1m/s) dans lequel une masse de neige ou de glace se décroche et dévale une pente. Au cours de sa chute, l'avalanche arrache des rochers, des arbres et érode la couche de neige sous jacente, voir le substrat s'il s'agit d'une **avalanche de fond** (glissement de l'ensemble des couches du manteau neigeux jusqu'au sol). Ces dernières se produisent fréquemment au printemps, le glissement de la neige humide et lourde sur un sol non-gelé a un effet érosif marqué sur les versants (fig.4).

On peut schématiquement assimiler une portion du manteau neigeux à un bloc de neige. La stabilité de ce bloc est assuré tant que les forces qui le retiennent (frottement sur le sol ou sur les cotés du bloc, frottement entre les couches de neige et la résistance de la couche de neige elle-même) sont supérieures aux forces qui tendent à le faire glisser (le poids du bloc et la pente). Si ces forces motrices augmentent (nouvelles chutes de neige, humidification du manteau neigeux, surcharge par un skieur), le bloc de neige se met en mouvement : c'est l'avalanche.

Il existe différents types d'avalanches : sèche/poudreuse, humide, plaque à vent, avalanche de fond... Une classification selon le mode d'écoulement permet de distinguer les avalanches en aérosol et les avalanches de neige dense.

Les avalanches en aérosols consistent en la descente d'un nuage d'air et de particules de neige. Ce type d'avalanche est très destructeur car le mélange de neige et d'air est de faible densité et se détache du sol. Ainsi le frottement est considérablement diminué et la vitesse très importante (jusqu'à plus de 300 km/h). L'effet destructeur est principalement dû à l'effet de souffle qui peut arracher toute une portion de forêt ou raser des bâtiments. Comme la neige est en suspension dans l'air, ce type d'avalanche ne suit pas forcément les variations du relief. La trajectoire est donc difficile à calculer et les avalanches en aérosol peuvent même remonter sur le versant opposé.

Les avalanches de neige dense sont moins rapides : leur vitesse ne dépasse que rarement les 100 km/h. Il s'agit de l'écoulement de la neige en suivant les dépressions du relief (couloirs, lits de torrents). L'effet destructeur est ici dû au poids de la masse de neige.

Dans les Alpes, on retrouve souvent ces deux types d'écoulement dans une même avalanche, on parle alors d'**avalanche mixte**.

Les effets géomorphologiques de la reptation de neige et des avalanches vous ont été présentés. Pour plus d'informations concernant les différents types ainsi que le danger d'avalanches, veuillez consulter le bulletin de l'Institut pour l'étude de la neige et des avalanches (<http://www.slf.ch>).



■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES



Fig. 1 – Reptation de la neige (Morgenberghorn, BE).



Fig. 2 – Lissage d'un versant par l'effet de reptation de la neige (Gros Chadoua, FR).

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES



Fig. 3 – Effet érosif marqué (griffure, arrachement et lissage) sur un versant par la reptation de la neige (Bachtal, VS).



Fig. 4 – Avalanche de fond (Morgenberghorn, BE).

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES

4.2.8 Autres mouvements gravitaires

Des études récentes liées notamment à la construction des tunnels ferroviaires et à l'analyse de reliefs de failles inverses ont permis de mettre en évidence de nouveaux types de mouvements de terrain.

Gonflement des vallées

Un massif montagneux peut être vu comme une éponge remplie d'eau. En fonction de la fracturation du massif, d'importantes quantités d'eau peuvent y être stockées (aquifère) ou y transiter. La construction d'ouvrage comme des tunnels, des galeries hydroélectriques ou des barrages peuvent sensiblement modifier le drainage naturel des massifs et provoquer de petites déformations de surface (tassement) sur de grandes surfaces. L'analyse de données recueillies dans le cadre de la construction du tunnel du Gotthard a montré que des déformations saisonnières naturelles des vallées avaient lieu : au printemps une fermeture rapide de la vallée (gonflement) se produit en raison très probablement de la recharge de l'aquifère montagneux par les eaux de fonte. En automne et en hiver, la vallée se rouvre à nouveau lentement. L'ordre de grandeur des mouvements horizontaux est d'environ 10-20 mm.

Rebond glacio-statique

Lors du Würm, les grands édifices glaciaires alpins ont provoqué une surcharge pondérale, entraînant un enfoncement progressif du massif alpin (de l'ordre de quelques mètres ?). Suite à la déglaciation, le rééquilibrage de masse a mené à des soulèvements, phénomène appelé **rebond glacio-statique** et correspondant à une variante de la poussée d'Archimède appliquée à la croûte terrestre. Ce processus est bien connu pour la Scandinavie, moins pour les Alpes. **Des reliefs en failles inverses** consécutifs à ce rebond postglaciaire (figs. 1-3), surtout présentes dans les roches gneissiques et granitiques, seraient un indice géomorphologique visible de la remontée de pans de montagne séparés entre eux par des **discontinuités verticales** (anciennes failles, limites lithologiques de couches, schistosité). L'origine de failles inverses (aussi appelées failles composites) n'est cependant pas unique, puisque les tassements de versants ou le fauchage par exemple peuvent également en produire.



■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES



Fig. 1 – Relief en failles inverses (la contre-pente est soulignée par les ombrages) de l'Oberi Fäsilalpü (VS).



Fig. 2 – La verticalité des failles inverses indique probablement que la cause de cette morphologie provient du rebond glacio-statique postglaciaire (et ne serait donc pas dû à un tassement du versant). Des tranches aval du massif gneissique de l'Aar – séparées les unes des autres par des systèmes de failles verticales hérités de la surrection des Alpes – seraient ainsi remontées par-dessus les tranches situées directement à l'amont.

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES



Fig. 3 – Faille inverse verticale de 3m de haut (Oberer Fäsilalpü, VS).

■ MOUVEMENTS GRAVITAIRES

4.3.1 Références bibliographiques

Ballantyne C.K. (2002) : *Paraglacial geomorphology*. Quaternary Science Reviews, 21, 1935-2017.

Bardou, E. (2002) : *Méthodologie de diagnostic des laves torrentielles sur un bassin versant alpin*. Thèse de Doctorat, Ecole polytechnique fédérale, Lausanne.

CREALP (2009) : *Centre de recherche sur l'environnement alpin*. Site internet : <http://www.crealp.ch/>.

Dapples F. (2002) : *Instabilités de terrain dans les Préalpes fribourgeoises (Suisse) au cours du Tardiglaciaire et de l'Holocène: influence des changements climatiques, des fluctuations de la végétation et de l'activité humaine*. Thèse 1395 UNIFR, Multiprint S.A. Fribourg.

Flageollet J.-C. (1989) : *Les mouvements de terrain et leur prévention*. Masson, Paris.

Frehner, M., Wasser, B., Schwitter, R. (2005) : *Gestion durable des forêts de protection*. OFEFP, Berne.

Greminger, P. Schlaffer, Th., Durth-Sachs, I., et al. (2003) : *Dangers naturels et Convention Alpine, Analyse des événements et recommandations*. ARE, Berne.

Heim A. (1905) : *Die Gletscherlawine an der Altels am 11. September 1895*. Neujahrsblatt d. Naturf. Ges. in Zürich, 1896.

Löw S., Hansmann J., Ebnetter F. (2008) : *Annual opening and closure of alpine valleys*. 6th Swiss Geoscience Meeting, Lugano, Abstract Volume: 6.

NAHRIS (2009) : *Dealing with Natural Hazards and Risks*. Campus virtuel suisse, site internet : <http://www.nahris.ch/>.

PLANAT (2009) : *Dangers naturels en Suisse*. Site internet : <http://www.planat.ch/>.

Raetzo H. (1997) : *Massenbewegungen im Gurnigelflysch und Einfluss der Klimaänderung*. vdf Hochschulverlag an der ETH, 256 p.

Ritter, F., Kochel, C., Miller, J. (1995) : *Process geomorphology*. 3^{ème} édition, Wm. C. Brown Publishers, Dubuque, USA..

Ustaszewski M.E., Hampel A., Pfiffner O.A. (2008) : *Composite faults in the Swiss Alps formed by the interplay of tectonics, gravitation and postglacial rebound : an integrated field and modelling study*. Swiss J. Geosci. 101 : 223-235.

Van Vliet-Lanoë, B. (2005) : *La planète des glaces, histoire et environnements de notre ère glaciaire*. Vuibert, mai 2005, Paris, 470 p.

Zepp H. (2002) : *Geomorphologie : eine Einführung*. Paderborn, Zürich, F. Schöningh, 354p.

