Dangers naturels

Recommandations 1997

Prise en compte des dangers dus aux mouvements de terrain dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire

version pdf

Office fédéral de l'aménagement du territoire OFAT

Office fédéral de l'économie des eaux OFEE

Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEFP

Impressum

Editeurs
Office fédéral de l'aménagement du territoire OFAT
Office fédéral de l'économie des eaux OFEE
Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage OFEFP

Auteur
Olivier Lateltin
OFEFP-SHGN, Berne

Groupe d'experts
Jean-Pierre Tripet, précidende
OFEFP-SHGN, Berne
Albert Boell
FNP, Birmensdorf
Christophe Bonnard
EPF-DGC-ISRF, Lausanne
Jörg Hansen
Dipartimento del Territorio
Cadenazzo
Bernhard Krummenacher
GIUB, Berne; Geotest SA, Zollikofen
Roberto Loat
OFEE, Bienne
Bernard Loup
OCAT, Fribourg
Jean-Daniel Rouiller
DTEE, Sion
Jean-F. Schneider
Géologie de l'ingénieur ETH, Zurich
Konrad Schrenk
OFAG, Berne
Claire-Lise Suter
OFEFP D+F, Berne
Gianni della Valle
OEHE, Berne
Laurent Vulliet
EPF-DGC-ISRF, Lausanne
†Danilo Zuffi
Inspection cantonale des forêts, Fribourg

Rédaction, mise en forme et réalisation
Daniel Bollinger
Kellerhals+Haefeli SA, Berne

Traduction
Francis Noverraz, Christophe Bonnard, Nathalie Bretz
EPF-DGC-ISRF, Lausanne

Version pdf (2001)
Bureau Felix Frank, Berne

Diffusion
OCFIM, 3000 Berne
No de commande: 310.023 f

Berne, 1997 (pdf 2001)

Avant-propos

Selon les nouvelles lois fédérales sur l'aménagement des cours d'eau et sur les forêts, les cantons ont l'obligation d'établir des cartes de dangers et d'en tenir compte dans les activités de l'aménagement du territoire. La présente publication fournit des recommandations pour l'accomplissement de cette tâche. C'est pourquoi elle s'adresse aussi bien aux **experts** de la Confédération, des cantons et des communes, responsables de l'évaluation des dangers dus aux mouvements de terrain et des mesures de protection, qu'aux **instances politiques** appelées à prendre des décisions concernant les activités de l'aménagement du territoire. Cette publication concerne aussi tous les **propriétaires** qui devraient être informés sur les dangers concernant leurs parcelles.

Ces recommandations ont été élaborées par un groupe de travail interdisciplinaire dirigé par le Service hydrologique et géologique national (OFEFP-SHGN). Ce groupe de travail est formé d'experts de l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), de l'Office fédéral de l'économie des eaux (OFEE), de même que de représentants provenant d'autres offices de la Confédération, des cantons (BE, FR, TI, VS), des Hautes Ecoles et de bureaux privés.

L'aménagement du territoire nécessite, pour tous les types de dangers naturels, l'élaboration de documents comparables. C'est pourquoi les recommandations présentées ici s'appuient dans leur contenu sur les «Directives pour la prise en considération du danger d'avalanches lors de l'exercice d'activités touchant l'organisation du territoire» (Office fédéral des forêts, 1984) et sur les «Recommandations pour la prise en compte des dangers dus aux crues dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire» (OFEE/OFAT/OFEFP, 1997). Les présentes recommandations* devront être prises en compte lors de l'établissement des cartes de dangers et de leur application.

Manfred Spreafico
Directeur a.i. du Service hydrologique et géologique national

Heinz Wandeler
Directeur fédéral des forêts

Christian Furrer
Directeur de l'Office fédéral de l'économie des eaux

Fritz Wegelin
Direction de l'Office fédéral de l'aménagement du territoire

Table des matières

Les faits 3
Mouvements de terrain 6
Identification des dangers 12
Evaluation des dangers 18
Planification des mesures 30
Annexes 39

* Après avoir subi quelques corrections et adaptations, ces recommandations seront publiées comme directives (semblables à celles concernant les avalanches).

Les faits: la carte de dangers comme document de base pour la planification des mesures

Les zones instables affectées de mouvements de terrain occupent en Suisse 6 à 8% du territoire national. Les régions les plus touchées sont les cantons alpins, les Préalpes entre le Léman et le lac de Constance, ainsi que certaines parties du Jura plissé.

Divers événements comme les éboulements de Randa (VS) en 1991 ou le glissement de Falli-Hölli (FR) en 1994 ont clairement montré que les dangers dus aux mouvements de terrain ne peuvent souvent pas être maîtrisés uniquement par des mesures de protection constructives ou de sécurité. Il est un autre fait, que le passé nous enseigne: l'utilisation du sol doit s'adapter aux données naturelles.

De ce point de vue, malgré toutes les difficultés qu'offre un espace comme la Suisse, à forte densité de population et exploité de façon intensive, les dommages potentiels doivent être réduits en premier lieu par des **mesures d'aménagement du territoire.**

Des mesures constructives de protection ne doivent être prises, en vue de réduire un danger potentiel, que là où existe déjà une utilisation du sol digne de protection, ou encore là où une modification de l'affectation s'avère absolument indispensable, après une complète pesée des intérêts. Les nouvelles lois fédérales sur les forêts (Lfo) et sur l'aménagement des cours d'eaux (LACE), entrées en vigueur en 1991, ont donné force de loi à cette priorité.

Avant toute autre chose, une **perception consciente** des dangers naturels est nécessaire pour qu'il soit possible d'assumer les responsabilités qu'ils impliquent. On ne peut s'attendre à des résultats durables qu'à partir du moment où tous les acteurs ont réellement pris conscience du danger présent.

Les nouveaux objectifs des lois susmentionnées concernent d'une part les ingénieurs responsables des ouvrages de protection, les aménagistes et les autorités impliquées, et d'autre part les assurances et les propriétaires fonciers qui peuvent contribuer d'une manière active à la réduction des dommages potentiels.

L'établissement de **cartes de dangers** est une condition préalable indispensable à la mise en application des lois citées ci-dessus par des mesures d'aménagement du territoire. Cet instrument est exigé par les lois fédérales sur les forêts et sur l'aménagement des cours d'eau (cf. en annexe le chapitre sur les bases légales). Ces cartes désignent les types de dangers menaçant une surface donnée du territoire; elles en indiquent les dimensions, l'intensité et la probabilité d'occurrence.

La menace créée par les dangers naturels, soit l'aléa, fait partie des **caractéristiques propres d'un site;** c'est une donnée comparable à la fertilité du sol ou à la pente, car elle conditionne une certaine occupation du sol ou la rend impossible. Dans le cadre de l'aménagement local, les autorités assignent aux zones considérées différents types d'affectation, selon leur aptitude propre.

Afin de protéger des vies humaines et d'empêcher des dommages aux biens et à l'environnement, certains modes d'occupation du sol doivent être interdits dans les zones à danger élevé ou moyen, ou autorisés seulement sous certaines conditions précises.

La **mise en vigueur de la loi,** qu'il s'agisse de procédures d'autorisation, de lois cantonales sur l'aménagement du territoire ou les constructions, ou encore de plans d'affectation, est du ressort des cantons et des communes. Le propriétaire peut encore réduire les dommages potentiels subséquents par des mesures qui lui sont propres.

Les cartes de dangers doivent être établies, dans la mesure du possible, pour tous les types de dangers naturels en même temps et doivent concerner des entités spatiales bien délimitées. La **répartition en degrés de danger** est élaborée indépendamment de l'affectation présente du sol.

Buts des recommandations

Les conflits existants relatifs à l'affectation du sol peuvent être mis en évidence et peuvent être atténués ultérieurement une fois que les zones de danger et le type de menaces ont été définis de façon contraignante, objective et univoque. Les présentes recommandations devraient donc contribuer à:

- Prendre en compte les dangers dus aux mouvements de terrain dans toutes les activités ayant des effets sur l'organisation du territoire (telles que l'élaboration et l'approbation des plans directeurs et des plans d'affectation, des conceptions et des plans sectoriels; la planification et la construction de bâtiments et d'installations; l'octroi d'autorisations et de concessions; l'attribution de subventions, etc.).
- Utiliser de façon appropriée le territoire et veiller notamment à son exploitation, en empêchant l'accroissement indésirable des dommages potentiels et en limitant le recours à la construction d'ouvrages de protection.
- Atteindre dans l'ensemble de la Suisse une bonne compréhension et une prise en compte des dangers naturels, au sein de groupes de travail interdisciplinaires, sur la base de critères et d'échelles de valeurs homogènes.
- Informer les autorités et les propriétaires fonciers des dangers possibles pour les rendre responsables des précautions nécessaires en vue d'éviter des risques inutiles.

L'aménagement des versants réduit le danger potentiel, l'aménagement du territoire limite les dommages potentiels

Démarche progressive

La prise en compte des dangers naturels nécessite une démarche progressive où il s'agit de répondre à la question **«Que peut-il se passer et où?».** Il faut alors estimer la probabilité et l'intensité des événements potentiels et finalement mettre en évidence les mesures nécessaires. Bien que les étapes de la démarche s'enchaînent aisément, il est important de franchir chacune d'elles systématiquement et en toute connaissance de cause. Même si le danger et ses causes semblent de prime abord connus, les mesures de protection ne doivent être prises que lorsqu'elles sont justifiables par les effets qui peuvent en résulter (réduction des dommages potentiels).

Les cartes de dangers sont la condition préalable fondamentale pour la mise en œuvre d'une protection contre les mouvements de terrain

Etape 1

La première étape est **l'identification et la description du danger.** Il s'agit là d'établir une documentation objective sur les observations dénotant un danger réel. Un événement passé reste toujours un bon élément d'appréciation pour un danger actuel, surtout si entre-temps aucune modification ne s'est produite dans le versant instable concerné, notamment par la mise en place d'ouvrages de protection. La dynamique d'un versant, naturelle ou influencée par l'homme, exige périodiquement une évaluation critique tenant compte des changements intervenus.

Les données de base élaborées dans cette première étape renseignent sur le pourquoi de l'appartenance d'une région à une zone dangereuse. En plus d'informer sur les causes, elles servent à délimiter les zones de danger et à planifier les mesures requises.

Etape 2

La deuxième étape est **l'évaluation** des dangers et l'élaboration des **cartes de dangers.** Les assertions concernant la probabilité et les dimensions d'un événement possible sont faites sur la base de tous les documents disponibles. Les observations sont pesées et évaluées, et si nécessaire complétées par des modélisations ou des recherches plus approfondies.

Le déroulement des événements dangereux est déterminant pour définir les mesures de réduction du danger et pour concevoir les ouvrages de protection ou les mesures à prendre dans les zones de glissement ou d'éboulement. L'effet supposé sur les surfaces exposées au danger est l'élément déterminant pour la planification des mesures à prendre dans le cadre de l'aménagement du territoire.

La carte de dangers sert de base pour l'évaluation des dommages potentiels et la justification économique des mesures de protection. Pour les aménagistes, la carte sert de base pour définir une affectation du sol adéquate, tandis que pour les propriétaires, elle est un document utile pour la mise en oeuvre de mesures de prévention individuelles.

Etape 3

La troisième étape est constituée par les **mesures de planification** à proprement parler**.** Dès qu'un danger est mis en évidence par ses dimensions et sa probabilité d'occurrence, dans une zone où il entre en conflit avec une affectation du sol présente ou planifiée, la question se pose aussitôt de savoir quelle contre-mesure peut être prise. Il faut bien faire la différence ici entre mesures de réduction des dommages, de réduction du danger ou de limitation du risque résiduel:

- Mesures de **réduction des dommages** (mesures passives): elles n'influencent pas le déroulement des événements, mais réduisent l'étendue des dégâts. Les mesures d'aménagement du territoire doivent garantir une affectation du sol adéquate par rapport au danger. La protection des biens contre un danger au moyen d'une méthode de construction adaptée peut souvent être garantie, lors de procédures d'autorisation, en formulant des prescriptions dans le cadre des plans d'affectation.
- Mesures de **réduction du danger** (mesures actives): elles ont un effet sur le déroulement des événements, bien qu'il faille observer qu'en général elles influencent la probabilité d'occurrence, mais pas forcément l'intensité du phénomène. A côté des mesures habituelles de protection (ouvrages ponctuels, filets contre les chutes de blocs),

Principes de base

1. La prise en compte des dangers naturels dans les plans directeurs et les plans d'affectation est un devoir légal. Les cartes de dangers constituent à cet égard une condition préalable.
2. Les cartes de dangers n'ont pas en elles-mêmes de portée juridique, mais elles l'acquièrent dans le cadre de l'approbation des plans directeurs et des plans d'affectation.
3. Il est du devoir des cantons de veiller à l'établissement des cartes de dangers.
4. Les cartes de dangers sont une condition préalable à l'obtention de subventions pour des projets de protection contre les dangers naturels, selon la loi sur les forêts et la loi sur l'aménagement des cours d'eau.

Relevé et prise en compte des dangers naturels par étapes successives

on doit aussi tenir compte des mesures concernant la surface du versant (entretien des forêts protectrices, reboisement, drainage), notamment dans la zone de provenance du phénomène.

• Planification des **mesures d'urgence** destinées à limiter le risque résiduel (systèmes d'alarme, services d'alerte, évacuation, secours en cas de catastrophe et autre moyens pouvant être rapidement engagés): ces mesures permettent d'éviter le pire. Toutefois, chaque mesure de protection prise peut ne pas fonctionner. En particulier, suivant l'ampleur de l'événement naturel, ces mesures peuvent être insuffisantes. Dès lors que l'événement s'est déclenché, il s'agit de sauver les hommes et les animaux. On ne peut alors souvent agir que de façon négligeable sur l'ampleur des dégâts. Avec les assurances couvrant les dommages causés par les éléments, les dommages subis peuvent, dans une large mesure, être remboursés aux personnes concernées.

1

Identification des dangers: «Que peut-il se produire et où?»

Documentation relative aux causes:

Documents de base
- Cartes
- Observations
- Mesures

Cartes des phénomènes

Documentation des événements passés

2

Evaluation des dangers: «Avec quelle fréquence et quelle intensité cela peut-il se passer?»

Etude des zones concernées et évaluation des indices au moyen des:

Cartes de dangers

3

Planification des mesures: «Comment pouvons-nous nous protéger?»

Application dans les domaines suivants:

Aménagement du territoire

Mesures de protection

Plan d'urgence

Les mouvements de terrain sont des déplacements gravifiques de masses rocheuses compactes ou désagrégées et/ou de terrain meuble (y compris de sol). Ils comprennent principalement les processus d'éboulement (chute de pierres et de blocs, éboulement et écroulement), les glissements de terrain et les coulées de terre. Ils peuvent se produire de façon rapide et brutale (éboulements, p.ex.), ou se dérouler lentement et de façon continue (glissements de terrain, p.ex.). L'origine, le déroulement et les effets des mouvements de terrain sont extrêmement hétérogènes. Par leur soudaineté, ils peuvent mettre les hommes en danger et détruire des bâtiments, des cultures et des forêts. Ils peuvent aussi induire, lentement mais de façon continue, des dégâts et des destructions de bâtiments, de cultures et de forêts.



Truffer, Felssturz

Mouvements de terrain

Causes

Les mouvements de terrain sont des déplacements (avec ou sans rupture) vers l'aval de masses rocheuses compactes ou désagrégées et/ou de terrain meuble (sols y compris) et d'eau, sous l'effet de la gravité.

Ils peuvent se produire sous forme de processus brutaux (chute de pierres et de blocs, éboulement et écroulement, glissement soudain, coulée boueuse, effondrement) ou lents et progressifs (fluage, glissement lent permanent).

Les processus à l'origine des mouvements de terrain sont très complexes et dépendent rarement d'une seule cause. La géologie, le relief et l'exposition sont des paramètres fondamentaux, plus ou moins constants sur de longues périodes; ils déterminent la **prédisposition générale** du terrain aux phénomènes d'instabilité. Le processus qui mène à une telle instabilité commence en fait dès la formation de la roche, c'est-àdire lorsque les propriétés chimiques et physiques de celle-ci sont bien établies. Ces propriétés déterminent notamment son comportement face à l'altération et à l'érosion. Les différentes glaciations quaternaires ont modelé les vallées alpines en forme d'auge. Lors du retrait glaciaire, libérés de l'appui de la glace, les versants des vallées se sont souvent retrouvés trop raides et instables.

Les mouvements de terrain résultent d'un **changement de l'équilibre des forces** dans le versant (rapport entre forces résistantes et forces motrices), à la suite de processus physiques et/ou chimiques qui, à leur tour, dépendent de différents facteurs. Ainsi, les processus d'altération agissant à long terme (conduisant à une diminution des forces résistantes), de même que les fluctuations de la nappe phréatique, influencent la stabilité d'un versant de manière continue. Par ailleurs, une pente peut aussi être déstabilisée rapidement, soit à la suite de l'érosion par une rivière au pied du versant, soit, mais plus rarement, suite à un tremblement de terre.

En général, l'eau joue un rôle déterminant pour les mouvements de terrain. Elle produit des pressions hydrostatiques dans les pores (pressions interstitielles), les fissures et les failles, de même que des forces de percolation. A l'état de glace, elle a en plus la capacité d'induire des mécanismes de rupture notables. Par ailleurs, elle peut provoquer le gonflement des minéraux argileux (pression de gonflement). La stabilité des pentes en équilibre critique peut être sensiblement réduite par ces divers effets.

Le **déclenchement** d'un processus dangereux survient lorsque la valeur limite d'un des facteurs déterminants est atteinte ou dépassée. Les cycles de gel/dégel, les précipitations sporadiques, de forte intensité ou de longue durée – éventuellement combinées à la fonte des neiges –, conduisent souvent à des mouvements de terrain spontanés.

Il n'est pas rare que les mouvements de terrain soient favorisés par des **influences anthropiques.** Ainsi, la surcharge d'une pente par des bâtiments et des remblais, les excavations sans dispositifs de protection dans un versant lors de travaux de construction, la surélévation du niveau de l'eau souterraine, le dynamitage, l'exploitation inappropriée de matières premières ou l'affectation inadéquate du sol peuvent accroître le danger de mouvements de terrain. Les effets anthropiques peuvent aussi contribuer à une déstabilisation à long terme du versant, en relation avec d'autres activités comme le déboisement, l'entretien insuffisant des forêts, le surpâturage, l'exploitation intensive et la dénudation du sol.

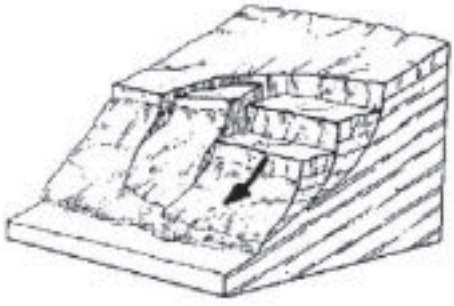
Mécanismes types

De nombreuses classifications des mouvements de terrain ont été proposées, basées sur des critères tels que le mécanisme des mouvements, la composition des matériaux, la vitesse des processus ou les mécanismes de déclenchement. Afin d'avoir une vision globale de ces mécanismes et d'éviter les confusions, les principaux types* de mouvements de terrain se caractérisent comme suit, conformément au «Multilingual Landslide Glossary» (glossaire multilingue des mouvements de terrain, WP/WLI):

- **Le processus de glissement** est un mouvement de pente vers l'aval, affectant une masse rocheuse et/ou de terrain meuble, le long d'une ou plusieurs surfaces de glissement ou suivant des zones relativement minces de déformation intense par cisaillement.
- **Le processus d'éboulement** (chute) commence avec la désagrégation de matériel rocheux ou meuble sur une pente raide le long d'une surface sur laquelle ne se développe que peu de mouvements de cisaillement. Le matériel tombe ensuite principalement en chute libre, en rebondissant et/ou en roulant.
- **Le processus d'écoulement** (par exemple coulée de terre) résulte du mouvement continu d'une zone superficielle de terrain quittant rapidement la zone de cisaillement, de manière compacte au départ, mais ne conservant généralement pas ce caractère compact. La répartition des vitesses au sein de la masse en mouvement est semblable à celle d'un écoulement visqueux.



Eboulement



Glissement



Ecoulement

Source: Amanti et al., 1992

* Les principaux types de mouvements, entre lesquels se produisent souvent des mécanismes de transition progressive, peuvent se manifester sous différentes formes.

Les **glissements de terrain** sont des mouvements de masses compactes et/ou de terrain meuble glissant vers l'aval. Ils résultent d'une rupture par cisaillement et se produisent en général sur des talus ou des versants de pente modérée à raide. Les instabilités naturelles de ce genre sont extrêmement courantes en Suisse et apparaissent sous de nombreuses formes, étonnamment diversifiées.

Un grand nombre d'entre elles sont d'anciens glissements, aujourd'hui en grande partie latents, mais qui peuvent soudainement se réactiver suite à des conditions défavorables. La plupart du temps, l'eau joue un rôle important dans les glissements de terrain, par l'action des pressions interstitielles, des écoulements souterrains ou par les pressions dues au gonflement des minéraux argileux. En simplifiant beaucoup, on peut distinguer deux types de glissements:

• Les **glissements de type rotationnel** sont en général de volume limité. Ils se produisent principalement dans des terrains meubles homogènes surtout argileux et silteux. Dans une coupe verticale, la surface de glissement est circulaire et plonge presque verticalement dans la niche d'arrachement. En règle générale, le mécanisme du glissement ne provoque qu'un faible remaniement interne du matériel glissé. Des dépressions avec crevasses ouvertes et des fissures de traction sont souvent visibles dans la moitié supérieure du glissement, alors que la masse glissée tend à s'étaler et à se désagréger au front du glissement, où peuvent se former des écoulements de boue (coulées de terre) en cas de saturation en eau de la masse.

Classification selon la profondeur de la surface de glissement
(en m sous la surface du sol)

Glissement	Surface de glissement
superficiel	0 – 2 m
semi-profond	2 – 10 m
profond	>10 m



Noverraz, glissement translationnel

• Lors de **glissements translationnels,** les couches de terrain ou les ensembles de couches stratifiées glissent sur une zone de faiblesse existante (souvent pendage stratigraphique, discontinuité stratigraphique, schistosité, plan de fissure ou de rupture). En plan, la taille de tels glissements est très variable et peut comprendre des surfaces allant de quelques mètres carrés à plusieurs kilomètres carrés. L'épaisseur des masses en mouvement atteint fréquemment plusieurs dizaines de mètres. Les zones de flysch, les schistes marno-calcaires ou les schistes métamorphiques sont les formations les plus sujettes à ce genre de glissement.

Vitesse moyenne de mouvement

La vitesse moyenne de mouvement des glissements atteint le plus souvent quelques millimètres par an pour un glissement substabilisé, très lent, et quelques centimètres à quelques décimètres par an pour un glissement actif. Il existe quelques cas exceptionnels où le glissement peut être bien plus rapide et où la masse en mouvement, sans perdre sa compacité, peut atteindre plusieurs décimètres par jour. Exceptionnellement, des mouvements très rapides peuvent se produire, comme par exemple au glissement de Falli-Hölli (6 m/jour en août 1994).

Classification

Les glissements peuvent être classés selon la **profondeur** estimée de la **surface de glissement** et selon la **vitesse** moyenne à long terme des mouvements (comme mesure de leur activité). Lors de l'évaluation du danger potentiel que représente un glissement, on ne doit pas seulement considérer le volume ou la vitesse du glissement.

Il faut aussi tenir compte des **mouvements différentiels** qui se manifestent et qui peuvent conduire au basculement des bâtiments ou à la formation de fissures. Les glissements peuvent aussi se transformer en glissements-coulées (coulées de terre) et atteindre des zones très étendues. Il faut enfin prendre garde aux **interactions** entre **glissements de terrain** et **cours d'eau**, par lesquelles de grandes masses de matériaux alluvionnaires peuvent être mobilisées. Ce phénomène peut conduire à la formation d'une retenue sur un cours d'eau, puis entraîner des débâcles (laves torrentielles) qui mettent en danger les zones situées en aval.

Classification selon l'activité
En fonction de l'évaluation de la vitesse moyenne de glissement à long terme:

Glissement	Vitesse de glissement
substabilisé, très lent	0 – 2 cm/an
peu actif, lent	2 – 10 cm/an
actif (ou lent avec phases rapides)	> 10 cm/an

Eboulements

Les éboulements au sens large (phénomènes de chute) sont des mouvements rapides de masses. Le matériel éboulé, qui s'est détaché du massif rocheux selon des surfaces de discontinuité (pendage, schistosité, fissures ou fractures), parcourt la plus grande partie de son déplacement dans l'air.

Ces phénomènes peuvent être classés en trois catégories: chutes de pierres et de blocs, éboulements (au sens strict) et écroulements. En général, on peut les subdiviser en trois domaines: la zone d'arrachement, la zone de transit et la zone de dépôt.



Geotest SA, chute de blocs

Chutes de pierres et de blocs

Les chutes de pierres et de blocs sont caractérisées par la chute sporadique de blocs plus ou moins isolés (pierre: Ø < 50 cm; bloc: Ø > 50 cm). Ce processus, répété ou soumis à des pointes saisonnières, caractérise la désagrégation continuelle d'une falaise rocheuse, déterminée par ses conditions géologiques, son exposition et son altération. L'estimation du volume des matériaux rocheux qui présente un danger potentiel de chute n'est possible qu'au moyen d'études détaillées de la roche.

Les vitesses de chute vont généralement de 5 à 30 m/s. Dans la description des mouvements d'une pierre ou d'un bloc, il convient de distinguer entre les phases de rebond et de roulement. Dans les pentes dont l'inclinaison est inférieure à 30° environ, les pierres et les blocs en mouvement tendent en général à s'arrêter. La forêt joue un rôle très important, par le fait que l'énergie cinétique de la plupart des blocs est fortement réduite par leurs chocs contre les arbres.

Eboulement

Lors d'un éboulement (au sens strict), un volume de roche important, se fragmentant plus ou moins intensément, se détache en bloc du massif rocheux et s'éboule. Le volume de matériaux concernés est en général compris entre 100 et 100 000 m^3 par événement. Dans des cas exceptionnels, des volumes sensiblement plus grands peuvent s'ébouler (p.ex. à Randa, en 1991: deux éboulements se sont produits consécutivement, totalisant quelque 30 mio m^3). Dans la pratique, l'estimation d'un volume de roche qui présente un danger potentiel d'éboulement exige des études détaillées du massif rocheux, comprenant une analyse approfondie de l'orientation spatiale des surfaces de discontinuité.

Le mode de rupture au sein du massif a en général peu d'influence sur le déroulement de l'événement. En comparaison avec le phénomène d'écroulement, les interactions entre les éléments de roche formant l'éboulement et l'énergie mise en oeuvre sont relativement limitées. Les vitesses de transport se situent principalement entre 10 et 40 m/s.

Classification selon la taille des composants, les volumes et les vitesses

Chute de pierres	ø < 50 cm
Chute de blocs	ø > 50 cm
Eboulement	
Volume	100 – 100 000 m^3
Vitesse	10 – 40 m/s
Ecroulement	
Volume	> 1 mio. m^3
Vitesse	> 40 m/s

Ecroulement

Lors d'un écroulement, un grand volume du massif rocheux (un à plusieurs mio m^3) se détache soudainement, sans que le mode de rupture correspondant ne soit déterminant. Le mécanisme initial peut par exemple s'expliquer par le développement d'une surface de glissement inclinée. Le mécanisme de mouvement de l'écroulement est déterminé par la topographie, de même que par l'interaction marquée entre les composants de la masse écroulée et par leur fragmentation intense.

Les caractéristiques particulières de ce phénomène sont des vitesses de chute élevées (de plus de 40 m/s) et de très grandes distances de transport (pouvant souvent atteindre plusieurs kilomètres). Compte tenu des grands volumes concernés, les écroulements peuvent modifier le paysage de façon durable. Les énormes masses écroulées forment souvent des barrages naturels dans les vallées de montagne, obstruant les cours d'eau et créant des retenues; en cas de rupture catastrophique du barrage, elles entraînent un danger d'inondation pour les régions en aval.

Coulées de terre (Glissement-coulée, glissement pelliculaire, flow slide)
Ces phénomènes d'instabilité ont la particularité de mettre en mouvement un mélange de matériaux meubles (principalement formé de sol et de couverture végétale) et d'eau, qui s'écoule rapidement à la surface de la pente. Les coulées de terre (ou de boue) se forment sur des versants plutôt raides sans qu'apparaisse une surface de glissement claire. Le volume de matériel déplacé est en général relativement restreint (ordre de grandeur: 20000m^3).

L'effet destructeur des coulées résulte de leur vitesse de propagation considérable (1 à 10m/s), due à leur teneur en eau élevée. Cette eau favorise l'expansion des matériaux charriés qui peuvent se répandre sur une aire dépassant de 10 à 100 fois la surface de la zone d'arrachement. Si elles débouchent dans un cours d'eau, ces coulées peuvent se transformer en laves torrentielles. Un passage graduel peut aussi exister entre les coulées de terre et les glissements de terrain.

A ce genre de phénomènes d'instabilité sont surtout sujettes les pentes raides formées de matériaux quaternaires peu perméables (moraines argileuses et colluvions limoneuses). Leur occurrence est aussi favorisée par les horizons sourciers et de fortes précipitations.

Phénomènes d'affaissement et d'effondrement
Des phénomènes d'affaissement et d'effondrement peuvent apparaître en relation avec le lessivage d'une roche souterraine soluble (p.ex. gypse, cornieule) ou avec des cavités souterraines préexistantes (p.ex. cavités karstiques).

Les formes typiques par lesquelles ils se manifestent sont les **dolines.** En particulier, de tels phénomènes sont fréquents dans les séries du Trias comprenant du gypse et de la cornieule. Ils se rencontrent aussi dans les calcaires karstifiés des Alpes et du Jura, où ils peuvent fréquemment se manifester sur des surfaces atteignant plusieurs km^2. Le **fauchage des couches** se produit par basculement vers l'aval des têtes de couches rocheuses en place, inclinées ou même subverticales, sous l'effet de la gravité. Ce phénomène affecte surtout des formations litées, schisteuses ou plaquetées, même en gros bancs. Le fauchage affecte généralement une épaisseur de roche de quelques mètres à quelques dizaines de mètres à partir de la surface du versant. Il peut évoluer, lorsque l'altération du versant s'accroît, en tassements (Sackungen), chutes de pierres et de blocs, et même éboulements. Ce phénomène de fauchage ne sera pas spécifiquement pris en compte dans ces recommandations.

Fluages
Le fluage est une déformation lente et permanente sur de longues durées, affectant les matériaux meubles et la roche. Ce phénomène se manifeste par des déformations continues sans rupture et/ou par un mouvement discontinu avec des amorces de glissement sur de nombreuses petites surfaces de discontinuité. Contrairement aux glissements proprement dits, il ne forme pas de surfaces de cisaillement continues dans le massif. Des phénomènes tels que les **tassements de versant** peuvent être considérés comme des formes de fluage profond.

Solifluction
La solifluction ou reptation est un fluage des couches de sol superficielles en relation avec les cycles de gel et de dégel. Lors de mouvements de versants dus au fluage ou au glissement, il est souvent difficile de conclure de façon univoque à la présence d'une surface de glissement continue. Ces processus sont souvent étroitement liés à de véritables glissements de terrain; c'est pourquoi ils peuvent être assimilés à ces derniers.

Tassements généralisés
Les tassements généralisés (Sackungen) sont des mouvements gravifiques dans les roches compactes, couvrant des zones étendues, avec une composante principale de mouvement vertical se développant le long de surfaces de discontinuité. La transition jusqu'à un mécanisme de glissement est progressive et leurs manifestations sont semblables, de sorte que ces processus sont également assimilés aux glissements de terrain.


Kienholz, coulée de terre

L'identification des dangers dus aux mouvements de terrain repose sur une documentation objective de diverses observations et mesures impliquant un danger donné. Il faut s'en tenir à décrire ces observations en les interprétant le moins possible! A cet égard, des indications permettant de juger de la qualité des observations – qu'elles reposent sur des estimations, des calculs ou des mesures – sont absolument indispensables.



Foto Klopfenstein SA, secteur d'éboulement potentiel

Identification des dangers

Cartes topographiques
La carte topographique est le document de base pour toute analyse de stabilité. Elle contient nombre d'informations pertinentes pour l'identification des dangers sous forme de symboles, de signes et d'autres éléments graphiques. Ainsi, par exemple, la morphologie des zones en glissement est souvent visible par le bombement des courbes de niveau; des symboles de blocs éboulés au pied d'une falaise peuvent laisser présager une production notable d'éboulis.

Cartes géologiques
La carte géologique donne des renseignements utiles sur la lithologie (type de roche, p.ex.), sur l'agencement structural (orientation et pendage des couches et des discontinuités) et sur la couverture quaternaire (moraine, éboulis ou glissement de terrain, par exemple). Elle donne encore des indications sur les circulations d'eau souterraine en milieu poreux et fissuré. Sur la base de ces données cartographiques, on peut reconstituer la structure tridimensionnelle des unités géologiques et évaluer le contexte de formation de possibles mouvements de terrain.

Les différents phénomènes d'instabilité de pente, comme les glissements, les éboulements ou les tassements généralisés sont représentés en général sur une carte géologique au 1:25 000 par leur périmètre. Il n'est pas fait mention de l'intensité ou de la fréquence de ces divers phénomènes. Ces informations permettent toutefois de localiser les zones sensibles aux mouvements de terrain, qui devront faire l'objet d'études plus poussées.

Autres cartes
Les cartes citées ci-dessous n'existent en Suisse que ponctuellement ou à petite échelle (p.ex. 1:100'000). Elles contiennent toutefois des informations importantes pour l'évaluation des dangers. Ainsi, la **carte géomorphologique** donne des informations détaillées concernant la couverture quaternaire. La **carte hydrogéologique** est utile pour comprendre le rôle exercé par l'eau souterraine dans le déclenchement des phénomènes d'instabilité. Dans les massifs montagneux, la circulation de l'eau est étroitement liée aux systèmes de discontinuité de la roche. Les **cartes géotechniques et des sols**, disponibles à différentes échelles, font également partie des documents de base qui permettent d'acquérir une meilleure connaissance des données locales dans les terrains instables.

Analyse des photos aériennes et mesures
Les photographies aériennes (à l'échelle 1:20 000 ou 1:25 000 environ; en noir et blanc, en couleurs ou en fausses couleurs) constituent un outil important pour l'évaluation des mouvements de terrain et de leur délimitation spatiale. Combinées avec la carte topographique (au 1:10 000 ou au 1:25 000), elles fournissent les bases de l'analyse géomorphologique générale.

Elles permettent généralement d'identifier divers phénomènes caractéristiques de mouvements de terrain lorsque leur surface dépasse 1 ha. Par ailleurs, à partir des photos aériennes, il est possible d'établir les structures géologiques principales du massif. Par des procédés photogrammétriques, on peut enfin mesurer les mouvements du terrain (vecteurs de déplacement).

Pour déterminer exactement l'ampleur des déplacements dans les zones instables, on recourt à diverses techniques de mensuration (triangulation, polygonale, nivellement, mesure de distances, Global Positioning System GPS). Les mouvements en profondeur et l'ouverture en surface des fissures ou des failles peuvent être mesurés par des extensomètres, des micromètres de forage ou des déformètres, parfois couplés à un module d'acquisition de données pour enregistrer les résultats en continu.

La détermination de la profondeur des plans de glissement, des vitesses de mouvement et de leur direction, s'effectue de préférence par inclinométrie ou micromètre dans un forage équipé à cet effet.

En surface, il est possible de déterminer des mouvements différentiels (p.ex.: ouverture de fissures) avec une précision suffisante, même avec des dispositifs de mesure de distance simples. Tous ces systèmes de mesure peuvent être équipés d'un dispositif d'alarme (éventuellement automatique).

Documentation des événements

La documentation des événements correspond à une liste d'événements observés. Cette documentation comprend des données descriptives sur les processus déterminants, les dommages constatés, la zone affectée, les facteurs déclenchants (en particulier les conditions météorologiques), de même que d'autres données concernant le déroulement de l'événement.

La description d'un événement peut être faite avec plus ou moins de détails selon son importance et selon les dommages causés. Dans chaque cas, la documentation des événements donne au moins une réponse à la question **«Que s'est-il passé, quand, où et avec quelle ampleur?»**

La documentation détaillée des événements doit en outre répondre aux questions: «Comment l'événement en cause s'est-il déroulé?» et «Pourquoi y a-t-il eu des dégâts?». Elle joue un grand rôle lors de phénomènes ayant des effets considérables et devrait être bien étayée.



SHGN, documentation d'un événement

Vue d'ensemble sur la documentation des événements

Contenu
Données concernant les causes et les effets dommageables d'événements. Le degré de détail dépend de l'importance des événements.

Echelle
Représentation des zones concernées à l'échelle 1:2000 à 1:25000.

Mise à jour
Permanente; dans le cas d'intempéries ou d'autre événement, sans délai. La limite des zones concernées et étudiées doit être indiquée.

Carte des phénomènes

La carte des phénomènes et le texte qui l'accompagne recensent les signes et indicateurs observés sur le terrain et procède à leur interprétation objective. Elle représente les phénomènes liés à des processus dangereux et décrit les secteurs exposés indépendamment du degré de danger.

L'analyse de terrain contribue à l'établissement de la carte des phénomènes. Elle est un complément important de la documentation de l'événement et sert à la reconnaissance et à l'estimation des types de danger possibles (configuration, mécanisme de déclenchement, genre d'effets). Le relevé de terrain s'appuie d'une part sur l'observation et l'interprétation des formes du terrain (p.ex. les endroits critiques), sur les propriétés structurales et géomécaniques des surfaces de discontinuité dans la zone de départ des processus d'éboulement, et d'autre part sur les «témoins muets» (p.ex. blocs éboulés) résultant des événements dangereux antérieurs et actuels. Elle permet aussi de tirer au clair les causes, les probabilités d'occurrence et d'autres facteurs importants ou symptômes concomitants relatifs aux événements qui se sont produits.

Vue d'ensemble de la carte des phénomènes

Carte
Recensement et représentation des signes et indicateurs de mouvements de terrain (p.ex. «témoins muets»). Données sur la tendance au développement de processus dangereux.

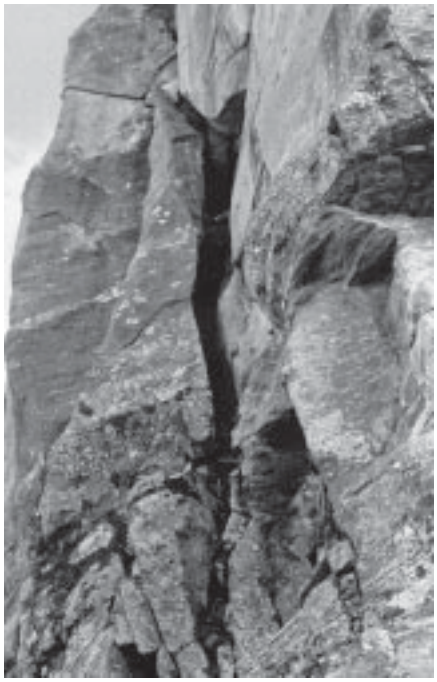
Echelle
1:1000 à 1:25000 selon l'objectif.

Mise à jour
Lors de la révision de la carte de dangers.

Afin de cartographier les dangers de manière crédible, il est essentiel de connaître à fond l'état passé et actuel du bassin versant et d'évaluer quelle peut être son évolution possible.

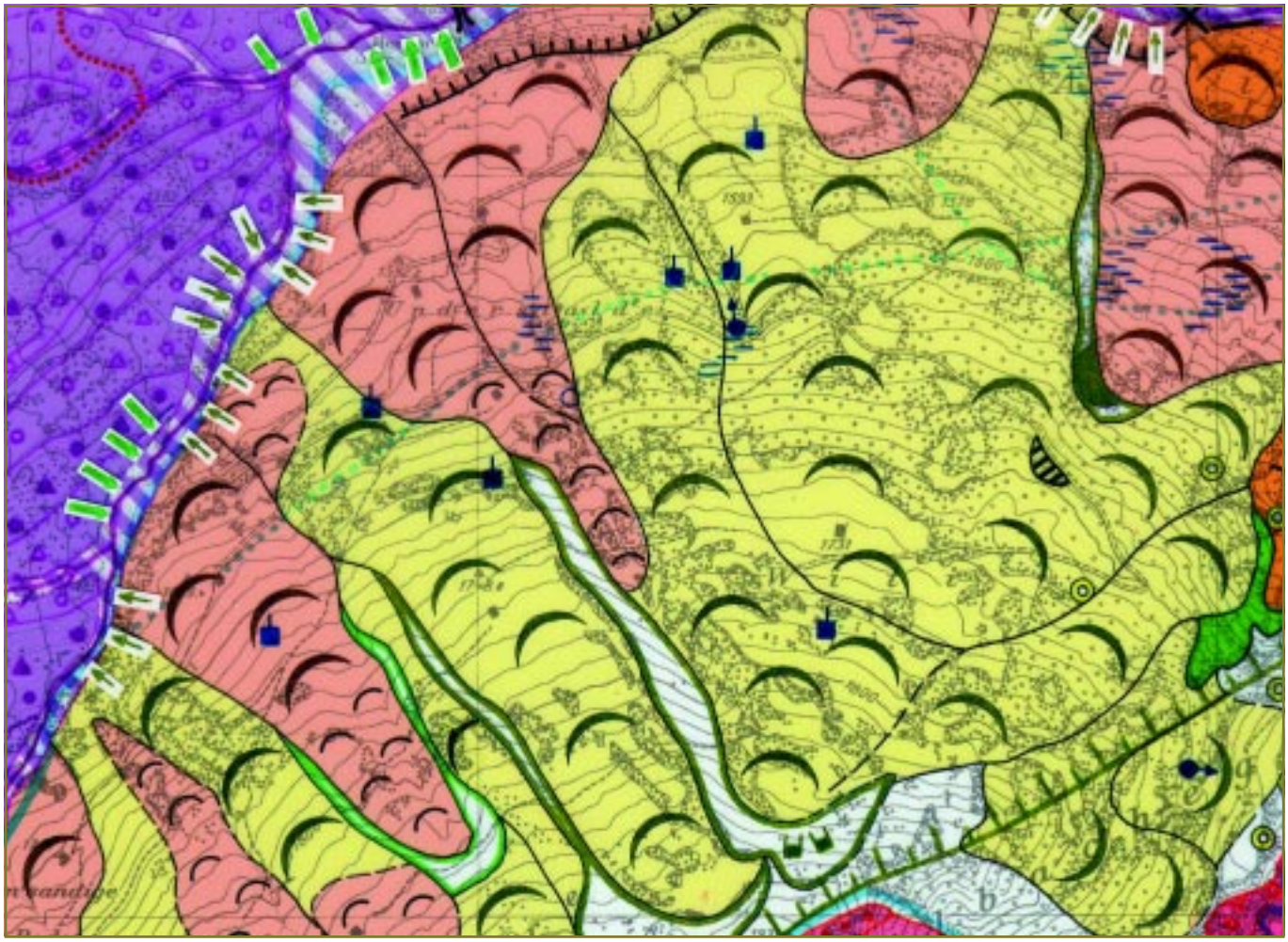
Afin d'harmoniser le contenu et les modes de représentation des types de dangers les plus divers (eau, avalanches, glissements, chutes de pierres, etc.) et les échelles diverses, l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP) et l'Office fédéral de l'économie des eaux (OFEE) ont élaboré et publié en commun en 1995 une brochure de recommandations* pour l'établissement de ces cartes avec proposition de légende, sous le titre **«Légende modulable pour la cartographie des phénomènes».** Ces recommandations ont pour but de faciliter des comparaisons possibles, de permettre une meilleure reproductibilité de l'estimation des dangers et de faciliter la pratique de la cartographie.

Dans le cas des **phénomènes de falaise** (éboulement et écroulement), la simple représentation des dépôts récents observés au pied des parois rocheuses ne suffit pas. L'évaluation des aléas (dangers potentiels) et des mécanismes de déclenchement possibles dans la zone de provenance est alors indispensable. Cette étude comprend la détermination de l'agencement structural des couches et des principales discontinuités, du degré d'altération de la falaise, ainsi que du volume probable des compartiments instables et de la taille des blocs. Ces caractéristiques peuvent être synthétisées dans une «carte des aléas», telle que celle établie dans le Canton du Valais (Rouiller et Marro, 1997).



Kellerhals+Haefeli SA, fissure ouverte

*Elle peut être commandée à l'OCFIM, 3003 Berne (No. de commande: 310.022 f/d)



Reproduit avec l'autorisation de l'Office du cadastre du Canton de Berne du 5.9.1997

Extrait d'une carte des phénomènes, publiée dans les recommandations intitulées «Légende modulable pour la cartographie des phénomènes» (1995).

Mesures techniques
L'efficacité des ouvrages de protection (p.ex. les filets contre les chutes de pierres) doit être périodiquement et soigneusement contrôlée, surtout à la suite d'événements notables. Il faut évaluer non seulement la résistance et la stabilité générale de chaque partie d'ouvrage, mais aussi son état et son influence sur la stabilité globale du versant. Ceci concerne aussi les installations de drainage dans les glissements de terrain.

Mesures biologiques
L'effet d'une forêt protectrice dépend de son état et de son développement. La vérification de ces facteurs fait partie de la planification forestière. Suite à des événements dévastateurs en forêt (tempête, incendie, attaque d'insectes), il faut à nouveau les vérifier.

Entretien
L'entretien, les réparations, les transformations et les rénovations doivent être planifiés et réalisés à temps, en tenant compte des problèmes posés.



Kellerhals+Haefeli SA, drainage défectueux d'une zone glissée

En se basant sur divers documents d'appréciation, l'intensité et la probabilité d'occurrence d'une instabilité de terrain potentielle doivent ensuite être définies sur des cartes de dangers. Cet instrument visualise les dangers d'instabilité de terrain et les menaces qui en découlent tant pour l'homme que pour les biens. Il faut bien se rendre compte qu'une carte de dangers est la représentation d'un danger existant selon le jugement d'un spécialiste et ne peut, en tant que telle, avoir force de loi. La mise en oeuvre des aspects contraignants en matière de législation, d'aménagement ou de procédure d'autorisation reste du ressort des autorités cantonales et communales.



Haeberli, agglomeration exposée au danger

Evaluation des dangers

Ces cartes indiquent les dangers existants au moment de l'expertise (type de dangers et importance du danger). Les cartes de dangers divisent le territoire en question en zones selon **trois degrés** de danger, représentés par des couleurs appropriées: rouge, bleu, jaune. Les limites entre ces différentes zones sont tirées de la carte des phénomènes, de la documentation des événements et le cas échéant d'autres documents de base (voir chapitre Identification des dangers).

Des modèles de calcul (analyses des trajectoires de blocs ou calcul du facteur de sécurité pour les glissements) peuvent être appliqués, de cas en cas, que ce soit pour déterminer l'extension possible des secteurs menacés par des chutes de pierre ou pour disposer de données quantitatives sur l'état de stabilité d'un secteur potentiellement instable.

L'évaluation de l'aléa ou du danger potentiel est faite en tenant compte de **l'état actuel.** Les ouvrages de protection existants ne doivent cependant être considérés que lorsque leur fonctionnalité et leur **entretien à long terme** sont garantis. Les mesures de protection planifiées, que ce soient de nouvelles constructions ou la remise en état d'installations existantes anciennes, ne doivent être prises en compte sur la carte de dangers que lorsque leur exécution est terminée.

Buts et signification

La carte de dangers est une carte d'aptitude qui montre quels secteurs sont peu ou pas appropriés pour certaines utilisations en raison des dangers naturels existants. Elle constitue donc le document de référence pour:

- la transposition de ces informations dans **l'aménagement du territoire** (élaboration des conceptions et des plans sectoriels de la Confédération et des cantons, des plans directeurs cantonaux ou des plans d'affectation, y compris la délimitation des zones de danger, publication de prescriptions concernant les constructions, autorisation de constructions);
- la planification des mesures pour la **protection des objets** et des mesures de réduction des dommages par les propriétaires. Par la comparaison de la carte des zones de dangers avec l'utilisation du sol, des conflits apparaîtront. Etant donné que l'utilisation du sol existante ne peut en principe pas ou pratiquement pas être modifiée, des **mesures de construction** sont la plupart du temps nécessaires pour obtenir le degré de protection souhaité. Les cartes de dangers constituent également une base pour la planification des mesures de protection, la mise en place d'un service d'alarme et l'organisation d'un plan d'urgence.

Carte indicative des dangers

But
Document de base du plan directeur pour une première identification grossière des zones de conflits d'intérêts, au cas où il n'y aurait pas encore de cartes de dangers.

Contenu
Vue d'ensemble grossière des zones en danger; données concernant les types de dangers, en principe sans tenir compte des degrés de danger (pas d'indications sur l'intensité et la probabilité); différenciation dans les grandes lignes.

Niveau de détail
restreint.

Echelles
de 1:10000 à 1:50000

Territoires concernés
Régions ou tout un canton.

Carte de dangers

But
Document de base du plan directeur et d'affectation du sol, de même que pour les projets de mesures de protection.

Contenu
Données exactes sur les types de dangers, l'extension spatiale et les dangers possibles selon trois degrés; documentation détaillée.

Niveau de détail
poussé (la délimitation à l'échelle de la parcelle doit être possible).

Echelles
de 1:2000 à 1:10000

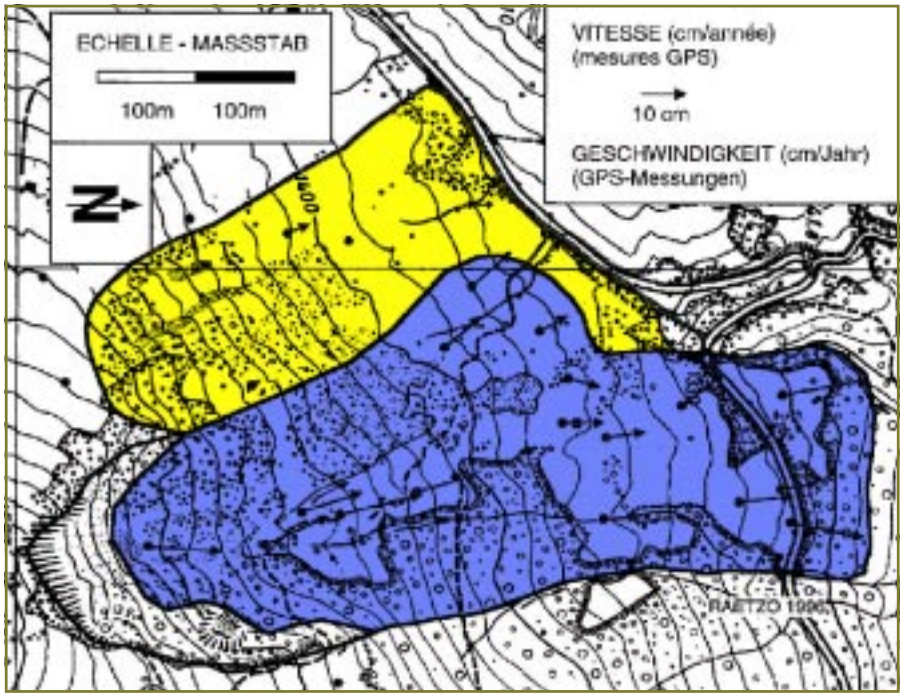
Territoires concernés
La priorité est donnée aux secteurs urbanisés, équipés ou faisant l'objet de projets d'équipement, de même qu'aux voies de communication.

Vérification: Périodiquement dans le cadre de la révision du plan.

Mise à jour: Dans le cas d'un changement important des conditions de danger (p.ex. suite à des mesures de protection ou à des modifications des conditions naturelles).

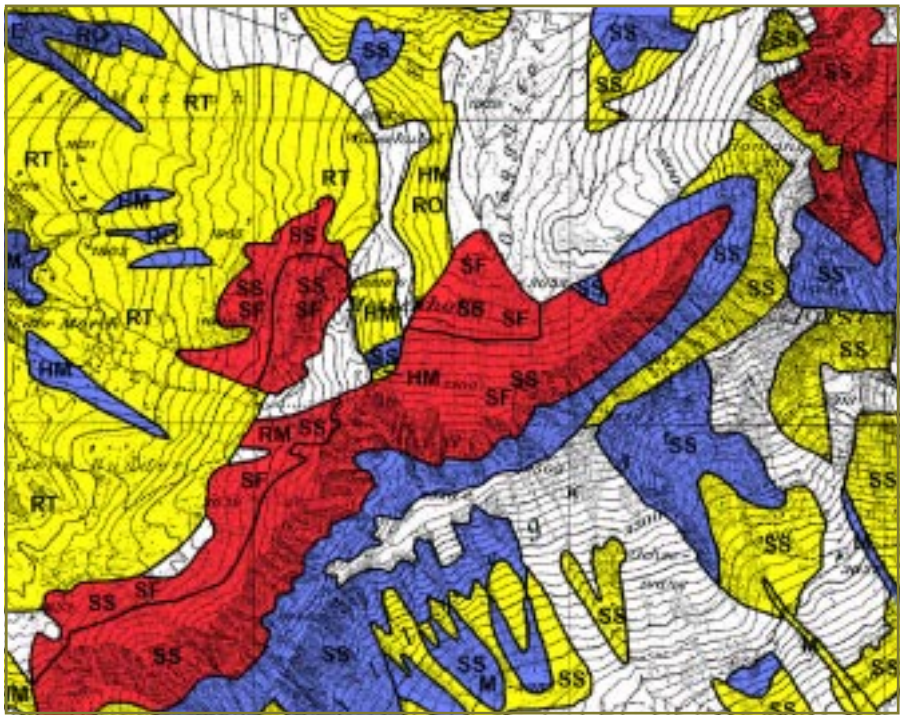
Exemples de cartes de dangers

Glissement de terrain



Reproduit avec l'autorisation de l'Office fédéral de la topographie du 15.12.1997

Carte combinée
- **Eboulements**
- **Glissements**
- **Coulées de terre**



Kellerhals+Haefeli SA (2)

Légende: voir texte page 22

La carte de dangers se compose de deux parties: d'une **carte** (il convient d'utiliser comme document de base cartographique des cartes ou des plans au 1:10000 ou à une échelle plus grande), et d'un **texte** (un rapport technique avec justification et description des zones de dangers).

Sur la carte de dangers, le périmètre d'étude doit être délimité. On assure ainsi une distinction claire entre les secteurs qui ne sont pas menacés et ceux qui n'ont pas fait l'objet d'investigation.

L'établissement des cartes de dangers doit résulter exclusivement de **critères scientifiques** (voir chapitre Identification des dangers). L'expert est fondamentalement libre de choisir ses méthodes, pour autant que celles-ci correspondent à l'état des connaissances scientifiques du moment.

Le niveau de détail des cartes de dangers dépend d'une part et surtout des dommages potentiels prévisibles, d'autre part des dangers potentiels. Lors de l'établissement des cartes de dangers, il faut, dans la mesure du possible, concevoir des entités **spatiales bien délimitées.** Enfin, il faut périodiquement mettre à jour les cartes de dangers pour tenir compte des modifications pouvant intervenir sur le site.



EPFL, données quantitatives de mouvements

Carte indicative des dangers

La carte indicative des dangers donne une vue d'ensemble sur les dangers potentiels et une représentation des dangers existants. Contrairement à la carte de dangers proprement dite, elle ne présente en règle générale **pas de différenciation** en degrés de danger.

La carte indicative des dangers est surtout adaptée au niveau du plan directeur (échelle 1:25000 ou 1:50000). Par cette carte indicative, les zones de conflits sont mises en évidence avant l'établissement de cartes de dangers détaillées, et ceci avec des moyens restreints; elle couvre une plus grande étendue, par exemple un canton entier.

Degrés de danger

Un diagramme harmonisé des degrés de danger a été développé sur la base des «Directives pour la prise en considération du danger d'avalanches lors de l'exercice d'activités touchant l'organisation du territoire» (Office fédéral des forêts et al., 1984), afin de garantir une évaluation homogène et équivalente des différents types de dangers naturels (crues, avalanches, glissements, etc.).

Deux paramètres sont déterminants pour graduer l'importance de la menace: **l'intensité et la probabilité** (fréquence ou période de retour). Ces paramètres sont traduits en degrés de danger dans une matrice (voir diagramme ci-dessous). On différencie **trois degrés de danger,** représentés par les couleurs rouge, bleue et jaune.

Dans le cas particulier des événements liés aux falaises (éboulements et écroulements), on peut procéder à une évaluation des dangers découlant d'événements très rares (mise en évidence respectivement **des dangers résiduels et des risques résiduels).** Les surfaces qui pourraient être concernées sont représentées par des hachures jaune-blanc.

Les degrés de danger sont choisis de telle manière qu'ils impliquent un type précis respectivement de comportement et de prescriptions en matière d'utilisation du sol. Ils indiquent le degré de mise en danger pour l'homme, les animaux et les biens de valeur notable. On considère que la sécurité de l'homme est généralement plus grande dans les bâtiments qu'à l'extérieur face à des dangers de mouvements de terrain.

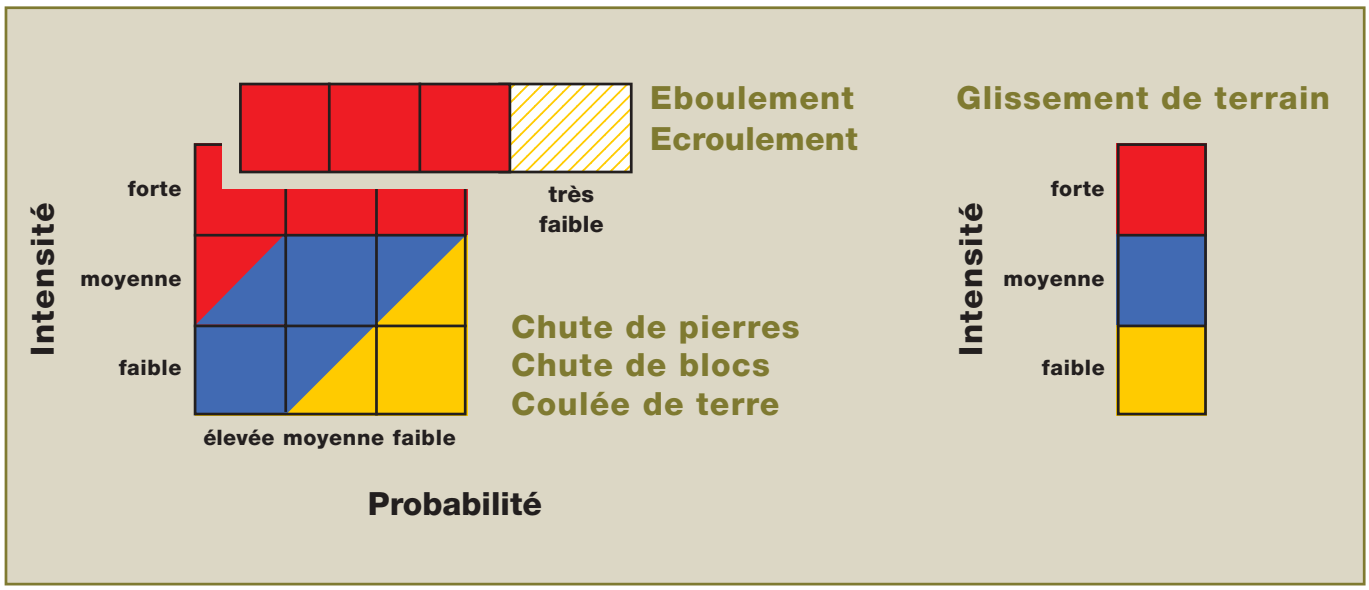
L'effet dommageable sera décrit pour chaque type et chaque degré de danger. Les degrés de danger seront en principe délimités avec précision pour chaque type de danger. Celui-ci est désigné sur la carte de dangers par un index:

- **SS** Chute de pierres et de blocs (Stein-, Blockschlag)
- **SF** Eboulement (Felssturz)
- **SB** Ecroulement (Bergsturz)
- **RO** Glissement superficiel (Rutschung oberflächlich)
- **RM** Glissement de profondeur moyenne (Rutschung mitteltief)
- **RT** Glissement profond (Rutschung tief)
- **HM** Coulée de terre (Hangmure)
- **D** Zone de dolines (Doline)

Dans le cas où une surface est menacée par plusieurs types de dangers – p.ex. dans le cas de phénomènes d'éboulements fréquents dans une zone en glissement –, cette situation doit être prise en compte de façon appropriée sur la carte de dangers. C'est, parmi les dangers identifiés, le degré de danger le plus élevé qui est considéré comme déterminant. En général, la superposition de plusieurs types de dangers ne justifie pas de passer à une classe de danger supérieure, puisque des mesures de réduction des dommages peuvent être prises contre chaque danger considéré isolément. Dans les régions menacées par plusieurs phénomènes dangereux, il est utile, dans bien des cas, lors de la mise en oeuvre des mesures d'aménagement du territoire, de fixer les conditions d'utilisation et, au besoin, les interdictions de manière différenciée.

Dans les diagrammes proposés, la «probabilité» et «l'intensité» ne sont pas introduites comme des grandeurs numériques, mais comme des classes de valeurs. Le principe de base est de représenter tous les types de dangers naturels, selon un diagramme intensité/probabilité, unique et de validité générale. Toutefois, dans le cas des mouvements de terrain, la multiplicité des processus exige l'utilisation de trois diagrammes différents.

Diagramme intensité-probabilité (diagramme des degrés de danger)



rouge: danger élevé

- Les personnes sont en danger aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur des bâtiments.
- Il faut s'attendre à la destruction rapide de bâtiments.
  ou:
- Les événements se manifestent avec une intensité plutôt faible, mais avec une probabilité d'occurrence élevée. Dans ce cas, les personnes sont surtout menacées à l'extérieur des bâtiments ou les bâtiments deviennent inhabitables.

La zone désignée en rouge correspond essentiellement à une **zone d'interdiction.**

bleu: danger moyen

- Les personnes sont en danger à l'extérieur des bâtiments, mais peu ou pas à l'intérieur.
- Il faut en principe compter dans cette zone sur des dégâts aux bâtiments, mais non sur leur destruction rapide, pour autant que le mode de construction ait été adapté aux conditions en présence.

La zone bleue est essentiellement une **zone de réglementation,** où de sévères dommages peuvent être réduits par des mesures de précaution appropriées.

jaune: danger faible

- Le danger pour les personnes est faible ou inexistant.
- Il faut s'attendre à de faibles dégâts aux bâtiments.

La zone jaune est essentiellement une **zone de sensibilisation.**

hachuré jaune-blanc: danger résiduel*

Des dangers avec une très faible probabilité d'occurrence et une forte intensité peuvent être signalés par un hachuré jaune-blanc. La zone hachurée en jaune-blanc est une **zone de sensibilisation,** mettant en évidence un danger résiduel.

* La délimitation des zones de sensibilisation est à mener de façon restrictive. Elle doit se faire en tenant compte du type de phénomène et du potentiel de dommages.

blanc: aucun danger connu, ou danger négligeable, selon l'état des connaissances actuelles

Intensité et probabilité

Les deux paramètres utilisés dans le diagramme des degrés de danger (intensité et probabilité) doivent être déterminés et classés pour chaque type de danger, selon une intensité faible, moyenne ou forte, et une probabilité faible, moyenne ou élevée.

Intensité

La description de l'ampleur d'un phénomène dommageable possible se fait en identifiant les valeurs seuils pour les degrés de danger, en fonction des effets dommageables possibles sur le type d'affectation du sol le plus important, soit la zone d'habitation. Les dommages probables pour les autres formes d'occupation du sol doivent être déduits de manière analogue. L'intensité est divisée en trois degrés:

- **Intensité forte:** les hommes et les animaux sont en danger à l'intérieur des bâtiments; il faut s'attendre à des dégâts considérables aux bâtiments allant jusqu'à leur destruction.
- **Intensité moyenne:** les hommes et les animaux sont en danger à l'extérieur des bâtiments, mais le sont peu à l'intérieur; il faut s'attendre à des dégâts aux bâtiments.
- **Intensité faible:** les hommes et les animaux sont peu menacés même à l'extérieur des bâtiments (sauf dans le cas de chute de blocs qui peuvent blesser et même tuer des hommes et des animaux); il faut s'attendre à des dégâts matériels aux bâtiments et à l'intérieur de ceux-ci.

Probabilité

Au lieu d'utiliser une échelle graduelle, par exemple celle de la période de retour, on a choisi de définir la probabilité au moyen de différentes classes. Les limites de classes établies à 30 et 300 ans correspondent aux conditions fixées dans les directives concernant les avalanches (Office fédéral des forêts et al., 1984). La limite de 100 ans provient d'une valeur de dimensionnement des ouvrages de protection utilisée pour les crues.

Le calcul de la probabilité d'occurrence des mouvements de terrain, pour autant qu'elle soit calculable, reste très incertain. La probabilité d'occurrence d'un événement n'est jamais une donnée à déterminer de façon univoque, mais elle englobe toujours un domaine qui peut correspondre aux limites des classes choisies.

Les concepts de fréquence, de période de retour et de probabilité d'occurrence sont pris comme équivalents, encore que les concepts de fréquence et de période de retour ne valent que pour des phénomènes répétitifs. Contrairement aux crues ou aux avalanches périodiques, les mouvements de terrain ne sont la plupart du temps pas des processus répétitifs. La formulation d'une période de retour a peu de sens, excepté pour les événements impliquant des chutes de pierres, de blocs et des coulées de terre, qui peuvent être corrélés au sens large avec des conditions météorologiques particulières répétitives. Il faut surtout évaluer la probabilité d'occurrence d'un événement pour une durée d'occupation du sol donnée.

Ceci permet d'approcher le vrai problème, car l'investisseur ne se pose en priorité pas de questions sur la périodicité des dangers, mais sur la probabilité que se produisent des dommages durant une certaine période d'occupation du sol, ou sur le degré de sécurité dont jouit un endroit donné face aux dangers naturels. La probabilité d'occurrence et la période de retour peuvent être mathématiquement liées, pour autant qu'elles se rapportent à unemêmepériode de référence. Soit l'équation:

$$p = 1 - (1 - {}^{1}/_{T})^{n}$$

où n est la période de référence donnée (par ex. 30 ou 50 ans), T est la période de retour et p est la probabilité d'occurrence d'un événement d'importance égale ou plus grande que celui de la période de retour T dans une période de référence donnée.

Si l'on considère une période de référence de 30 ans (soit une génération), la probabilité qu'un événement de période de retour de 30 ans se produise est de 64% (ou environ 2/3), de 26% (environ 1/4) pour une période de retour de 100 ans et 10% pour une période de retour de 300 ans.

Le calcul de la probabilité d'occurrence pour une période déterminée montre clairement que même pour une période de retour relativement longue (300 ans), le danger résiduel n'est pas négligeable: un événement avec une période de retour de 300 ans a une probabilité d'occurrence de 15% de survenir dans une période de 50 ans. Cela correspond, en fait, à la probabilité de faire un 6 en jetant une seule fois un dé!

Probabilité		**Période de retour**
qualificatif	exemple sur une période d'utilisation de 50 ans:	période de retour comme indication de la probabilité en années:
élevée	100 à 82%	1 à 30
moyenne	82 à 40%	30 à 100
faible	40 à 15%	100 à 300

Danger résiduel

Par principe, l'échelle de probabilité n'est pas limitée dans le domaine des événements très rares, tout comme l'échelle d'intensité ne l'est pas pour les phénomènes d'ampleur considérable. Les types de dangers qui ont une très faible probabilité d'occurrence sont classés comme danger résiduel pour les utilisations usuelles.

Pour les dangers de mouvements de terrain, la limite entre les probabilités dont on doit tenir compte pour la planification des utilisations courantes du territoire et les risques que l'on peut imputer à un danger résiduel (risque résiduel) a été fixée à un événement de 300 ans de période de retour.

Les difficultés de l'estimation numérique ne dispensent pas de la nécessité de savoir définir de façon approchée, si la **probabilité est élevée, moyenne ou faible.** Mais il ne peut s'agir alors que d'ordres de grandeur. Comme les probabilités devraient être évaluées plus ou moins identiquement pour les différents types de dangers, on utilisera les mêmes limites de classes pour les mouvements de terrain que pour d'autres dangers naturels.

Dans le domaine du danger résiduel, les dangers identifiables, mais très rares et de ce fait difficilement quantifiables, peuvent être représentés par un figuré hachuré jaune-blanc. La représentation de ces dangers est particulièrement recommandée lorsque de fortes intensités sont possibles, que les dangers potentiels sont grands ou encore quand il est possible que la probabilité d'occurrence augmente considérablement par rapport à celle prévalant aujourd'hui. Ceci est en particulier le cas pour les secteurs potentiellement menacés par des éboulements ou des écroulements, sans qu'il n'apparaisse de signe évident d'activité dans la zone de départ laissant présager un événement imminent. La limite d'utilisation entre le jaune-blanc et le blanc (aucun danger connu ou danger négligeable) n'est pas quantitativement définie.



Kellerhals+Haefeli SA, danger résiduel d'éboulement

Critères d'évaluation de l'intensité

Il n'y a pas de mesure valable en général pour évaluer l'intensité des phénomènes d'instabilité. Selon les mécanismes des divers processus, on peut toutefois fixer des valeurs indicatives pour définir les limites des classes d'intensité forte, moyenne et faible. Les critères appliqués à cet effet se réfèrent en général à la zone où se développe le processus ou à la zone menacée. Dans le cas des dangers purement potentiels, il ne faut fonder l'évaluation de l'intensité prévisible des dangers que sur les caractéristiques de la zone de départ.

Chutes de pierres et de blocs
Le critère significatif est l'énergie d'impact dans la zone exposée (énergie de translation et de rotation). Les valeurs limites suivantes sont préconisées (E = énergie cinétique):

- Intensité forte: E > 300 kJ
- Intensité moyenne: 30 < E < 300 kJ
- Intensité faible: E < 30 kJ

La limite de 300 kJ correspond approximativement à l'énergie d'impact qui peut être supportée par un mur en béton armé, pour autant que l'immeuble entier soit correctement dimensionné (une note de calcul justificative est indispensable). La limite de 30 kJ correspond à l'énergie maximale absorbée par des barrières rigides en bois de chêne (traverses de chemin-de-fer).

Eboulements et écroulements
Une classe d'intensité forte (E > 300 kJ) est toujours atteinte dans la zone d'impact. La détermination des zones cibles des trajectoires de blocs soumises théoriquement à des intensités faible et moyenne présente de grandes incertitudes. Il est donc recommandé de renoncer à délimiter d'une façon artificielle ces diverses zones affectées par une moindre intensité.

Glissements de terrain
La plupart des glissements montrent des mouvements continus, combinés quelquefois avec des phases rapides de réactivation. On admet une intensité faible lorsque les mouvements moyens annuels à long terme sont inférieurs à 2 cm/an et une intensité moyenne s'ils atteignent une valeur de un à quelques dm/an. On se réserve la possibilité de considérer une intensité forte dans les zones de cisaillement ou de mouvement différentiel marqué. Une intensité forte peut également être attribuée si des phénomènes de forte réactivation ont été observés ou peuvent survenir dans des secteurs localisés avec des déplacements horizontaux supérieurs à un mètre par événement. De plus, une intensité forte peut qualifier des glissements de faible épaisseur avec des vitesses rapides (v > 0.1 m/jour). Pour les glissements de terrain, ces critères d'intensité seront directement traduits en classe de danger.

Coulées de terre
Dans les zones exposées à des phénomènes de coulées de terre, étant donné leur pente, l'état du sol et les conditions climatiques, l'intensité dépendra de l'épaisseur de la couche mobilisable qui peut être entraînéepar ce processus. En général, il existe une relation directe entre l'épaisseur de la couche de terrain et le volume répandu par la coulée (de 100 m^3 à plusieurs milliers de m^3). Une faible intensité est proposée pour des couches mobilisables d'une épaisseur inférieure à 0,5 m. La limite entre intensité moyenne et forte peut être fixée pour une épaisseur de l'ordre de 2 m.

Tassements, effondrement
Pour les phénomènes de tassementet d'effondrement liés à des dissolutions souterraines et à la karstification des roches, le critère d'amplitude dépend notamment de l'épaisseur de la couche de sol (moraine par exemple) recouvrant la formation. La présence de nombreuses dolines est un excellent indice pour déterminer une intensité moyenne de ces phénomènes de tassement. Il est recommandé de ne pas différencier d'autres classes d'intensité pour ces phénomènes.

Phénomène	Intensité faible	Intensité moyenne	Intensité forte
Chute de pierres/ Chute de blocs	E < 30 kJ	30 < E < 300 kJ	E < 300 kJ
Eboulement/ Ecroulement	-	-	E > 300 kJ
Glissement de terrain	v: ≤ 2 cm/an	v: dm/an (> 2 cm/an)	Forts mouvements différentiels; v > 0.1 m/j pour les glissements superficiels; déplacement > 1 m par événement
Coulée de terre:			
potentielle	e < 0.5 m	0.5 m < e < 2 m	e > 2 m
réelle	-	h < 1 m	h > 1 m
Tassement	-	présence de dolines	-

E: énergie cinétique
e: épaisseur de la couche mobilisable
h: épaisseur du dépôt de la coulée de terre
v: vitesse de glissement moyenne à long terme

Chutes de blocs et de pierres
Si durant les trente dernières années (p.ex. selon les témoins muets et les archives), des chutes de blocs et de pierres se sont clairement manifestées de manière significative, il faut alors compter sur une probabilité d'occurrence élevée ($p > 2/3$). S'il n'y a que des traces très incertaines ou si des événements semblables remontent à très longtemps, il faut compter avec une probabilité moyenne ($1/4 < p < 2/3$). La limite avec une probabilité plus faible ($1/10 < p < 1/4$) doit découler de l'interprétation du spécialiste en ce qui concerne la stabilité actuelle et la sécurité du versant.

Eboulements et écroulements
Les éboulements et les écroulements sont presque toujours des événements uniques, pour lesquels il n'est pas possible de parler de probabilité d'occurrence au sens strict. Il faut donc renoncer à différencier entre probabilité élevée, moyenne et faible. Il faut par contre évaluer si une probabilité d'occurrence $p > 1/10$ (en 30 ans) peut être considérée – et donc les classer en zone rouge de danger – ou s'il se justifie de compter sur un danger résiduel (risque résiduel).

Les secteurs où l'on constate des mouvements actifs, des fissures ou des chutes de pierres isolées provenant de la partie dangereuse, sont à classer en zone rouge de danger. En cas de doutes, un classement en zone de danger résiduel (risque résiduel), donc dans une zone hachurée jaune-blanc, est justifié. Celle-ci n'a aucune incidence immédiate pour les propriétaires, mais les autorités sont tenues de mettre en oeuvre des observations périodiques et une surveillance.

Glissements
La majorité des glissements sont des processus continus. C'est pourquoi il n'existe pas au sens strict de probabilité d'occurrence. Les phases de glissement actives sont souvent liées aux intempéries et sont par conséquent soumises à la probabilité d'occurrence de conditions météorologiques particulières (p.ex. précipitations ininterrompues combinées à la fonte de la neige). Les mouvements différentiels accélérés sont surtout dangereux. La probabilité d'accélération d'un glissement permanent est d'autant plus grande que la vitesse moyenne des mouvements à moyen terme est élevée. De ce point de vue, les vitesses de mouvements observées à long terme constituent en même temps un moyen d'estimation de la probabilité d'une accélération différentielle soudaine.

Cela vaut aussi pour la formation spontanée de processus superficiels de coulées (coulées de terre), par exemple lors de précipitations extrêmes. La formation spontanée ou la réactivation de glissements déjà existants peuvent aussi être provoquées par des processus liés aux torrents. La probabilité d'occurrence repose alors sur celle du déclenchement de ces processus.

Tassements, effondrement
Les tassements liés à la dissolution d'un sous-sol soluble, constituent pour la plupart des phénomènes continus. Selon la nature du sous-sol et l'épaisseur de la couverture, on peut avoir des phases actives sous forme d'effondrements au-dessus de cavités souterraines. Bien qu'il s'agisse d'événements spontanés pour lesquels existe en théorie une probabilité d'occurrence, on les considère comme des événements permanents, d'autant plus que l'évaluation de la probabilité d'occurrence dans ces cas est des plus spéculatives.

Danger et effet dommageable possible

Le danger pour les vies humaines et les animaux est particulièrement élevé lorsqu'il y a effet de surprise. Le temps nécessaire pour donner l'alerte **(temps d'alerte)** est donc une indication pour l'évaluation de la mise en danger:

• Les **processus de chutes de pierres et de blocs** surviennent la plupart du temps de façon soudaine. Le temps d'alerte est donc court à très court et ne laisse pratiquement pas de temps pour une évacuation. Les **éboulements** et les **écroulements** s'annoncent souvent quelques jours ou semaines à l'avance par un accroissement d'activité des chutes de blocs ou de pierres. Lorsque l'on porte à de tels signes l'attention nécessaire, il est possible de mettre en oeuvre les mesures d'urgence correspondantes (surveillance, système d'alarme, préparation de moyens techniques) et d'ordonner une évacuation à un moment donné (p.ex. éboulement de Randa, Valais, 1991). En cas de danger aigu d'éboulement ou d'écroulement, il faut empêcher le retour des personnes dans le secteur classé en zone de danger, car un tel événement se déroule si vite qu'il ne laisse aucune possibilité de fuite (p.ex. écroulement de Val Pola, Valtelline, 1987, 28 morts).

• En cas de **glissements de terrain,** le temps d'alerte est en général relativement long, de sorte que des mesures d'urgence et une évacuation peuvent être mises en oeuvre à temps. Les personnes ne sont donc pratiquement pas mises en danger si elles adoptent un comportement adéquat. En cas de glissements de terrain résultant d'une **érosion** des berges liée à des crues, il est en général possible de repérer le danger quelque temps à l'avance (fraction d'heure). Si l'alerte est donnée à temps et que les personnes ont un comportement adéquat, elles ne sont de ce fait presque pas mises en danger. Mais le déclenchement du glissement peut survenir de façon soudaine.

• En cas de **coulées de terre,** les alertes sont extrêmement difficiles à formuler. Dans des conditions de site spécifiques (topographie, structure du sol, végétation), les précipitations extrêmes constituent le facteur déclenchant. Comme celles-ci peuvent être aussi perçues à temps dans les secteurs où des coulées de terre sont probables, il ne se produit généralement pas de véritable effet de surprise. Le danger peut donc être pressenti et il est possible de prendre des mesures de précaution.

Méthodes de calcul

Les méthodes d'analyse qui modélisent soit l'équilibre des masses instables, soit leurs mouvements, correspondent à des hypothèses et nécessitent des données paramétriques-précises. Chaque modélisation ne livre donc des résultats significatifs que lorsque les données de base sont plausibles et que les hypothèses formulées sont réalistes (voir annexe).

Il faut prendre garde au fait que des généralisations trop grossières et simplificatrices peuvent bien conduire à des résultats concrets, mais qui ne sont pas nécessairement significatifs.



Bonnard, habitations détruites par un glissement

Glissements de terrain

Intensité forte
Les modifications importantes affectant le terrain conduisent à des mouvements différentiels notables du sous-sol et portent un sérieux préjudice à la stabilité des bâtiments. Suite aux fissures qui se développent dans les éléments de structure du bâtiment, aux tassements qu'ils subissent et à leur basculement, une destruction partielle ou totale des bâtiments est possible. Les portes et les fenêtres ne peuvent plus être utilisées. Les hommes et les animaux sont mis en danger dans les bâtiments. En cas d'écroulement, il y a danger de mort. Des réparations ne peuvent être réalisées qu'à grands frais. La plupart du temps, toutefois, les dommages structurels sont si graves qu'une évacuation et la destruction du bâtiment sont inévitables. Les infrastructures sont fortement affectées (p.ex. routes coupées). Il se produit des ruptures de conduites. Un barrage de cours d'eau est possible.

Intensité moyenne
Les mouvements de terrain causent des fissures dans les murs, mais cependant pas aux éléments de la structure qui garantissent la stabilité du bâtiment. L'étanchéité des joints et les liaisons entre les différentes parties du bâtiment sont endommagées. Les portes et les fenêtres coincent. Les hommes et les animaux ne sont pas immédiatement mis en danger dans les bâtiments. Les dommages concernent cependant la qualité de l'habitat. En général, des réparations sont réalisables avec des moyens raisonnables. Les infrastructures subissent des dommages (p.ex. déformations des routes et des conduites superficielles et souterraines). Les drainages peuvent se boucher.

Intensité faible
De petits mouvements de terrain conduisent à des dommages légers (petites fissures, dégâts aux crépis). La stabilité du bâtiment n'est en aucune manière affectée. Les bâtiments rigides de grande taille ne sont en général pas touchés. Les hommes et les animaux ne sont pas mis en danger. Les routes peuvent présenter des dommages insignifiants.

Processus d'éboulement

Intensité forte
L'impact de pierres et de blocs conduit à de graves dommages. De grosses fissures dans les murs porteurs de l'immeuble et des trous dans les parois ou le toit peuvent conduire à une destruction partielle ou totale. Les hommes et les animaux sont fortement menacés, même à l'intérieur des bâtiments. En cas d'écroulement de la maison, il y a danger de mort. Des réparations ne peuvent être réalisées qu'à grands frais. Souvent les dommages structurels sont si graves qu'une évacuation et la destruction du bâtiment sont inévitables. L'accumulation des matériaux éboulés peut former un barrage de retenue d'un cours d'eau (risque de rupture de ce barrage). Les infrastructures superficielles peuvent être fortement endommagées et coupées (p.ex. routes, lignes de transmission).

Intensité moyenne
L'impact des pierres cause des dommages plus ou moins grands aux parois selon les caractéristiques de la construction, mais ne met pas en cause la stabilité du bâtiment (à condition que l'immeuble ait été adéquatement conçu et testé en conséquence). Les portes sont fortement endommagées ou détruites. Les hommes et les animaux sont mis en danger dans les bâtiments. Les dommages affectent la qualité de l'habitat. En général, des réparations sont réalisables avec des moyens raisonnables. L'accumulation des matériaux éboulés peut former un barrage de retenue sur de petits ruisseaux. Les routes et les conduites superficielles peuvent être endommagées et momentanément coupées.

Intensité faible
En cas de chutes de blocs, les parois peuvent être perforées. Les hommes et les animaux ne sont en général pratiquement pas mis en danger dans les bâtiments (une note de calcul justificative est nécessaire).

Coulées de terre

Intensité forte
L'impact de grandes masses de graviers, de boue et de bois, mêlés à de l'eau, sur les structures porteuses des bâtiments, peut conduire à de graves dommages structurels ou à une destruction soudaine. Les hommes et les animaux sont fortement menacés suite aux dangersd'irruptionde la couléeetd'inondation. Les réparations impliquent souvent de grands frais. Les modifications substantielles du terrain avec de grandes zones d'érosion, des dépôts de graviers et des inondations conduisent à l'interruption, l'endommagement ou la destruction des infrastructures (p.ex. routes, conduites).

Intensité moyenne
Malgré leur faible épaisseur, les coulées de terre sont dangereuses à cause des blocs et graviers transportés. L'impact des pierres et des blocs et l'irruption de l'eau peuvent causer des dommages à l'enveloppe du bâtiment et à l'intérieur, sans toutefois mettre en cause la stabilité du bâtiment. Les hommes et les animaux sont mis en danger à l'extérieur. La qualité de l'habitat peut être sérieusement affectée. Des réparations sont en général réalisables à des coûts raisonnables. Le dépôt de graviers, de boue et de bois peut endommager et interrompre les infrastructures superficielles (p.ex. routes). Les écoulements, les conduites et les drainages peuvent être bouchés.

Intensité faible
Ne s'applique pratiquement, dans le périmètre d'écoulement des coulées de terre, que dans le cas de masses de matériaux d'épaisseur réduite ou dont le mouvement a été freiné, ou encore dans le cas d'une irruption d'eau. Dommages modestes à l'enveloppe du bâtiment ou à l'intérieur. La stabilité du bâtiment n'est affectée en aucune manière. Les personnes et les animaux sont peu menacées à l'extérieur.

La phase d'évaluation des dangers visait à établir ce qui pourrait se passer. L'objectif de la planification des mesures est de déterminer quel événement est acceptable ou comment s'en protéger. La détermination des objectifs de protection permet de définir la sécurité souhaitée pour les différentes catégories d'objets. Si le degré de protection existant est suffisant, on doit s'assurer, par un entretien et par des prescriptions d'utilisation appropriées, que respectivement le danger et le dommage potentiel, ne grandissent pas d'une manière incontrôlée, rendant indispensable des mesures de protection. Mais en raison du développement rapide des zones construites, des insuffisances en matière de protection existent en de nombreux endroits, auxquelles des mesures d'entretien et d'aménagement ne suffisent plus à remédier; il sera nécessaire de mettre en oeuvre des mesures constructives de protection.



BLS, ouvrages de protection

Planification des mesures

La carte de dangers sert de document de base spécialisé pour la prise en compte des dangers naturels dans le cadre de nombreuses tâches et activités de l'aménagement du territoire. Il faut particulièrement tenir compte des dangers naturels dans les cas suivants:
• lors de l'élaboration et de l'approbation des plans directeurs et des plans d'affectation, des conceptions et des plans sectoriels de la Confédération, de même que lors de l'établissement des études de base requises;
• lors de la planification, de la construction, de la transformation et de l'utilisation de bâtiments et d'installations;
• lors de l'octroi de concessions et d'autorisations pour des constructions et des installations, de même que pour d'autres droits touchant à l'utilisation du sol;
• lors de l'octroi de subventions pour des constructions et des installations (particulièrement pour les voies de communication et les installations d'entretien, ainsi que pour les bâtiments d'habitation), les travaux d'assainissement des versants, les améliorations foncières ou les mesures de protection.

Les dispositions de la loi et les instruments de l'aménagement du territoire constituent un cadre adéquat pour la prise en compte des dangers naturels dans les activités de l'aménagement du territoire. Il s'agit en premier lieu, lors de la phase de mise en oeuvre, d'en utiliser les possibilités d'exécution et de profiter intégralement des possibilités de manoeuvre qu'offre ce cadre. Au besoin, on procédera à des adaptations et on apportera des compléments aux lois cantonales.

Vue d'ensemble sur la prise en compte des dangers naturels

dans le plan directeur (art. 6 à 12 LAT)	**dans le plan d'affectation (art. 14 à 24 LAT)**
Responsable du plan directeur le canton	**Responsable du plan d'affectation** la commune
Forme carte et texte; documents de base	**Forme** plan de zone et règlement des constructions
Echelle de la carte/ degré de concrétisation en général 1:50 000	**Echelle de la carte/ degré de concrétisation** 1:2000 à 1:5000
Objectifs Coordination, dans l'optique de l'organisation du territoire, de tous les domaines traités ici concernant la Confédération, le canton et les communes.	**Objectifs** Détermination des types d'affectation, délimitation des zones à bâtir et des zones non constructibles.
Contenu relatif aux dangers Mesures visant à assurer la coordination et réglant les démarches ultérieures, dans le texte; éventuellement délimitation grossière des zones de danger, sur la carte.	**Contenu relatif aux dangers** Prise en compte des zones de danger désignées sur la carte des dangers selon les différents types et degrés de danger et selon les conséquences correspondantes pour l'affectation.
Degrés de danger Généralement 1 degré: danger présent, danger non présent; données supplémentaires sur les principaux types de dangers prédominants: C = crues A = avalanches M= mouvements de terrain	**Degrés de danger** 3 degrés: danger élevé, moyen et faible; données sur les types de dangers et les conséquences qui en découlent pour l'affectation du sol.
Précision Prise en compte globale (texte seulement), ou grossière prise en compte des zones de danger.	**Précision** Prise en compte assez précise des zones de danger pour pouvoir qualifier chaque parcelle.
Mise à jour Compléments et mise à jour lors de changements des conditions ou de l'apparition de nouvelles tâches; réexamen intégral du plan directeur et, si nécessaire, révision tous les 10 ans.	**Mise à jour** Lorsque le danger augmente à cause d'événements naturels ou diminue de façon démontrable, suite à des mesures de protection; lors de la révision complète du plan de zone (env. tous les 10–15 ans).
Caractère contraignant du plan directeur contraignant pour les autorités	**Caractère contraignant du plan d'affectation** contraignant pour les propriétaires

Selon l'article 6 de la loi fédérale sur l'aménagement du territoire (LAT), les cantons doivent désigner, notamment dans les études de base de leur plan directeur, «les parties du territoire qui sont gravement menacées par des forces naturelles ou par des nuisances.»

Le **plan directeur cantonal** est un instrument au service de l'organisation du territoire, de la coordination et de la prévention. Quant à sa forme, le plan directeur est constitué d'une carte et d'un texte et s'appuie sur des études de base. Le plan directeur contient des principes d'aménagement visant à assurer la coordination.

Il décrit en outre la situation initiale, du point de vue de l'aménagement du territoire. Le plan directeur a force obligatoire pour les autorités. Il remplit les buts suivants:

- il montre la façon de coordonner les activités qui ont des effets sur l'organisation du territoire, compte tenu du développement souhaité;
- il détermine l'orientation générale de la planification et de la collaboration et en décrit les étapes nécessaires;
- il donne aux autorités chargées de l'aménagement à tous les échelons administratifs des contraintes légales dans l'exercice de leur pouvoir d'appréciation.



Kellerhals+Haefeli SA, zone d'habitation exposée aux dangers

Domaine des dangers naturels

Dans le domaine des dangers naturels, le plan directeur peut en particulier remplir les objectifs suivants:

- détecter à l'avance les conflits potentiels entre l'affectation du sol et les dangers naturels, et désigner les services spécialisés à consulter;
- élaborer une vue d'ensemble sur les documents de base existants ou à établir concernant les dangers naturels (p.ex. l'établissement des cartes de dangers, la coordination des procédures relatives aux différents types de danger);
- formuler les principes à appliquer par le canton pour la protection contre les dangers naturels;
- définir les exigences et les mandats à mettre en oeuvre dans les étapes suivantes de planification, particulièrement dans le cadre du plan d'affectation communal (p.ex. délimitation de zones de danger).

Carte du plan directeur

Sur la carte du plan directeur, on ne pourra qu'esquisser les zones de danger en tant que données de base. On peut envisager d'insérer comme contenu du plan directeur certains conflits d'affectation occasionnés par les dangers naturels ou encore les ouvrages de protection en projet.

Texte du plan directeur

En ce qui concerne les dangers naturels, c'est le texte qui revêt le poids le plus important. Il doit donner une vue d'ensemble sur les études de base existantes ou encore à établir (conception des cartes de dangers), indiquer les principes de base pour la protection contre les dangers naturels et dresser une liste exhaustive des mesures nécessaires, ainsi que des services administratifs compétents. Enfin, il doit charger les communes de désigner, dans leur plan d'affectation, les zones de danger pour lesquelles il est nécessaire d'instaurer des interdictions de construire et des restrictions d'utilisation.

Au niveau des plans d'affectation, les degrés de concrétisation et de contrainte sont tels qu'ils permettent et assurent une prise en compte adéquate des dangers naturels dans l'utilisation du sol.

L'objectif est de délimiter des **zones de danger à caractère contraignant** (tout comme pour les zones à bâtir, les zones agricoles et les zones à protéger dans le plan d'affectation), ou d'établir une base juridique conduisant au même effet. D'après l'article 18 de la loi fédérale sur l'aménagement du territoire, qui mentionne «d'autres zones d'affectation», la législation cantonale peut prévoir d'autres zones que celles à bâtir, agricoles ou à protéger.

Sur cette base juridique, des zones de dangers peuvent être délimitées dans le plan d'affectation. Elles ont un caractère contraignant pour les autorités et les particuliers.

Les prescriptions particulières relatives aux zones de dangers sont fixées dans le **règlement communal de construction.** Cette règlementation précise les conditions et les restrictions d'utilisation, ces dernières pouvant aller jusqu'à l'interdiction de construire. Le règlement communal peut également prévoir des utilisations différenciées tenant compte de la nature du danger. Bien qu'il soit théoriquement prévu d'avoir recours à une pesée des intérêts lors de l'établissement du plan d'aménagement local, il peut pratiquement être exclu que tout autre intérêt puisse justifier le renoncement complet ou partiel à une zone de danger ou la modification d'une telle zone.

Signification des degrés de danger

Les degrés de danger sont attribués avant tout en fonction de leurs conséquences pour la construction. Ils doivent permettre d'éviter les menaces qui pèsent sur les personnes et les animaux, et de réduire autant que possible les dégâts aux biens. Dans certains cas particuliers, des recherches plus détaillées peuvent être nécessaires au moment de la demande du permis de construire, par exemple pour déterminer concrètement les conditions liées à l'autorisation. Dans la zone agricole, les constructions concernées par les différents degrés de danger sont soumises aux mêmes prescriptions que dans les zones à bâtir. L'aménagement du territoire ne se prononce en principe pas sur une utilisation agricole adéquate du sol (type de culture). Des contrats passés avec les agriculteurs concernés peuvent s'avérer judicieux.

Plans d'alarme et d'évacuation

Les plans d'alarme et d'évacuation (plans d'urgence) doivent être préparés pour toutes les zones de danger. En particulier, les chemins d'évacuation menant dans une zone sans danger doivent être clairement définis.

Objets sensibles

Les objets sensibles sont d'une part des bâtiments et des installations où résident un nombre particulièrement élevé de **personnes** difficiles à évacuer. C'est le cas notamment pour les hôpitaux, les homes et les écoles. D'autre part, les objets sensibles comprennent des bâtiments et des installations pouvant subir de **gros dommages,** même lors d'événements de faible intensité. Ceci est particulièrement valable pour les centres de stockage et de production ayant une forte concentration de produits dangereux, ou pour les décharges. Par ailleurs, font partie des objets sensibles les bâtiments et les installations pouvant subir d'importants **dommages économiques** directs ou indirects, même lors d'événements de faible intensité. Ceux-ci comprennent les centraux téléphoniques, les postes de couplage, les centres informatiques, les installations d'alimentation en eau potable, les stations d'épuration.

Zone rouge: danger élevé

Par principe, **aucune construction ni installation,** servant à abriter des hommes et des animaux, n'est autorisée ou ne peut être agrandie. Les zones à bâtir non construites doivent être déclassées. Aucun bâtiment détruit ne peut être reconstruit, sauf exception si le site d'implantation est impératif (et ceci seulement après que les mesures de sécurité nécessaires ont été prises). Les transformations et les changements d'affectation ne sont autorisés que lorsque le risque est ainsi diminué (c'est-à-dire lorsque le cercle des personnes en danger n'est pas agrandi et que les mesures de sécurité ont été améliorées). Pour les zones d'habitation existantes présentant un déficit flagrant de protection, il faut, selon les possibilités, prévoir des mesures de protection par des ouvrages.

Zone bleue: danger moyen

Les constructions y sont autorisées **sous conditions.** Ces conditions doivent être fixées en fonction de chaque type de danger dans les règlements de construction et de zones. Exceptionnellement, des précisions plus détaillées peuvent être nécessaires. Il ne faut pas y implanter des objets particulièrement sensibles, et dans la mesure du possible aucune nouvelle zone à bâtir ne doit y être délimitée.

Zone jaune: danger faible

Les propriétaires de terrain doivent être sensibilisés aux **dangers existants** et aux mesures possibles pour prévenir les dégâts. Il faut prendre des mesures de protection spéciales pour les objets sensibles.

Zone hachurée jaune-blanc

Elle met en évidence les risques résiduels. Un plan d'urgence et des mesures de protection spéciales pour les **objets sensibles** sont nécessaires. Les installations qui impliquent un potentiel élevé de dommages sont à éviter.

Modèle d'article pour le plan d'affectation communal
Exemple: extrait d'article-type d'un règlement communal de construction RCC (Canton du Valais)

Exemple

Complément au règlement de construction et au plan de zones

Zones de danger: zones de glissement

Ces zones englobent des secteurs qui sont exposés aux dangers liés aux glissements de terrain. Elles figurent sur le plan d'affectation des zones à titre indicatif. Elles sont distinguées comme suit:
Zone rouge = danger élevé de glissement
Zone bleue = danger moyen de glissement
Zone jaune = danger faible de glissement

Zone de danger rouge (danger élevé de glissement)

Aucune construction n'est autorisée dans le périmètre qui est d'expérience exposé à un danger élevé ou qui est, de manière prévisible, menacé par un tel danger, si son implantation est de nature à mettre en péril les personnes, les animaux et d'autres biens importants. Seule une expertise géologique de l'ensemble du périmètre permettra de libérer éventuellement des secteurs pour la construction à des conditions qui seront fixées sur la base de l'expertise.

Zone de danger bleue (danger moyen de glissement)

Il s'agit d'un périmètre où le degré des connaissances géologiques démontre qu'un danger réel existe mais qu'il peut être atténué de façon acceptable par des mesures constructives. D'une façon générale dans ce périmètre – à défaut ou en complément de mesures collectives – tout nouveau bâtiment ou transformation de bâtiment tendant à augmenter la capacité habitable doit être connecté à un réseau de canalisation d'égoût et d'eaux pluviales. Ce dernier point est valable aussi pour les accès.

Pour toute construction ou transformation dans ce périmètre, doit être jointe à la demande d'autorisation de construire une expertise établie par un bureau spécialisé (géologues diplômés). Celle-ci décrira les mesures constructives à prendre en fonction de la qualité du terrain et des scénarios d'événement proposés. Elle comprendra notamment un descriptif des terrains, une évaluation des risques d'instabilité dus aux eaux superficielles et souterraines ainsi que les mesures de sécurité à prendre (mode de fondation, consolidation du sous-sol, structures particulières pour le bâtiment et les canalisations, etc.). L'expertise fera l'objet d'une approbation formelle de la part de l'administration communale et du géologue cantonal.

Les mesures constructives suivantes sont au minimum exigées dans ce périmètre:
- le bâtiment doit être construit sur radier général avec le premier niveau rigide en béton armé;
- les eaux superficielles (collectées par le toit, routes d'accès et autres surfaces imperméables) ainsi que les eaux souterraines (ceinture drainante) doivent être évacuées jusqu'au collecteur communal;
- lors de la construction, les travaux doivent être effectués en respectant le plan de sécurité édicté par les normes SIA 160 et 191.

Dans tous les cas, le bureau auteur de l'expertise suivra les travaux afin de vérifier la bonne application des mesures qu'il a préconisées. Il établira un rapport de conformité à l'intention de la commune et du géologue cantonal.

Zone dedanger jaune (danger faible de glissement)

Les mesures constructives exigées ci-dessus sont en principe applicables dans ce périmètre pour toute construction d'un volume égal ou supérieur à 700 m^3 SIA. Toutefois, sur la base d'une expertise géologique, le requérant peut demander d'y déroger.

Face à la mise en danger liée aux mouvements de terrain, diverses mesures et recommandations doivent être respectées en relation avec les zones urbanisées, les infrastructures, les surfaces agricoles et les terrains de loisirs, en vue de l'affectation adéquate du sol.

Zones urbanisées

Dans la **zone de danger bleue,** les nouvelles constructions, les agrandissements et les transformations sont autorisées, mais sous réserve de l'observation de certaines mesures qui dépendent du type de danger. Les mesures à prendre doivent être établies de cas en cas par un expert (géologue, ingénieur civil).

Pour réduire les dommages dus aux **glissements de terrain*,** il faut en général:

- éviter les excavations dans la pente et la mise en place de charges défavorables;
- adopter des fondations sur la roche en place;
- réaliser les fondations d'un immeuble sous la surface de glissement;
- prévoir un radier général en béton armé pour reprendre les mouvements différentiels;
- réaliser éventuellement un clouage de la pente, des ancrages ou des solutions similaires jusque sous le plan de glissement pour accroître la stabilité de la pente;
- prévoir des raccords de conduites flexibles;
- abaisser le cas échéant le niveau de l'eau souterraine;
- ne pas laisser s'infiltrer les précipitations.

Pour réduire les dommages dus aux **éboulements** (sens large), il faut:

- adopter des dispositions constructives (pour le mur amont) propres à résister à l'impact de blocs isolés (p.ex. béton armé);
- prévoir des ouvertures minimales (fenêtres et portes) dans le mur amont.

Pour réduire les dommages dus aux **coulées de terre,** il faut:

- réaliser des entrées rehaussées et éviter les fenêtres dans les murs sur une hauteur minimale de 50 cm audessus du terrain;
- dimensionner le mur amont de manière à résister à l'impact de blocs isolés et à la poussée créée par l'accumulation de la coulée (p.ex. béton armé).

Dans la **zone de danger jaune,** les mesures citées ci-dessus sont aussi utiles. Des dommages excessifs peuvent en particulier être réduits par des radiers généraux en béton armé (glissements de terrain), des ouvertures minimales de fenêtres et de portes (éboulements), et des entrées ou des fenêtres rehaussées (coulées de terre) dans la paroi amont.

Infrastructures

Les infrastructures telles que les voies ferrées, les routes et les lignes de transmission sont liées à un site et sont d'intérêt public, souvent d'intérêt national, ce qui nécessite une protection par des mesures techniques dans la zone de provenance d'un danger ou par des mesures prises directement sur l'objet.

Les dangers élevés pour les personnes exposées ou les conséquences économiques et écologiques suite à la rupture ou à l'endommagement de ces infrastructures, par exemple d'une installation pour la distribution du courant ou d'une station d'épuration, exigent en général un haut niveau de sécurité.

Zones agricoles

Les secteurs qui sont souvent touchés par des événements dommageables (zones de danger rouge et bleue) sont peu appropriés pour une agriculture intensive. Pour les installations indispensables (p.ex. abris, abreuvoirs), il faut trouver dans la mesure du possible des sites d'implantation en dehors des zones rouges, surtout si la classification a été établie à la suite d'événements fréquents.

La constatation générale suivante est valable pour l'agriculture: en cas de coulées de terre ou d'éboulements, les cultures agricoles sont la plupart du temps anéanties. Dans de nombreux cas, cette constatation est aussi valable pour les glissements très actifs. La fertilité du sol des surfaces concernées peut être durablement amoindrie par suite du dépôt d'alluvions ou d'éboulis et de l'érosion de la couche d'humus. Les cultures sensibles sont à éviter sur les glissements de terrain permanents.

Installations de loisirs

Les terrains affectés à une fonction de délassement ne donnent généralement lieu qu'à une moindre concentration de biens de valeur, mais par contre représentent un danger plus élevé pour les personnes. En général, pour l'usage des installations de loisirs, un risque plus élevé est accepté. Le danger pour les personnes peut souvent être ramené à un niveau acceptable au moyen

* Dans l'application de ces mesures, il faut prendre garde à la profondeur des surfaces de glissement actives ou potentielles.

d'un dispositif d'alerte approprié, sauf lorsque l'on doit compter soit avec la présence de personnes ayant besoin d'aide, soit avec l'effet de surprise durant le sommeil. Il faut vérifier en particulier dans quelle mesure une autorisation accordée apparaît acceptable face à un dommage possible aux infrastructures et à une utilisation élargie des installations annexes (p.ex. clubhouse).

Selon le type d'installation de loisirs, il faut tenir compte des particularités suivantes:

• **Parcs et espaces verts** servant au délassement: aucune restriction due aux zones de danger.

• **Places de sport** telles que courts de tennis ou terrains de football, stades d'athlétisme: éviter les zones de danger à fortes intensités ou fréquences élevées (zone de danger rouge), en particulier en cas d'éboulements et de coulées de terre. Une tolérance est possible en zone rouge lorsque les événements sont rares (en principe avec une période de retour >100 ans).

• **Terrains de camping:** le risque de danger pour les personnes est élevé, car les précipitations extrêmes estivales (et donc par là une propension accrue aux coulées de terre, glissements ou éboulements) peuvent coïncider avec la période de plus forte affluence. C'est pourquoi il faut préparer à l'avance un plan d'alarme et des chemins de fuite sûrs. Les terrains de camping habités à plus long terme avec des aménagements d'infrastructures et où prédominent les caravanes résidentielles stationnées à l'année doivent être refusés dans les zones à événements fréquents, étant donné que le danger pour les personnes est plus grand dans les véhicules qu'à l'air libre.

• **Grandes manifestations:** il faut interdire l'organisation de grandes manifestations dans les zones sujettes à des types de dangers de forte intensité survenant d'une manière soudaine (coulées de terre, éboulements) et dans lesquelles le temps d'alerte est court, si une évacuation à temps ne peut être assurée.

Glissements de terrain

En cas de glissements de terrain, on peut mettre en oeuvre principalement les mesures suivantes:

• Abaisser la nappe phréatique de pente par des fossés drainants et des dispositifs de drainage.
• Capter les venues d'eau.
• Empêcher l'infiltration de l'eau des ruisseaux dans la masse glissée en la dérivant dans des conduites.
• Excaver éventuellement des matériaux dans la zone motrice du glissement, et placer un remblai dans la zone résistante (au pied du glissement).
• Accroître la résistance au cisaillement au niveau de la surface de glissement par l'inclusion de clouages, d'ancrages ou de pieux.
• Améliorer les caractéristiques mécaniques des sols par des injections.
• Construire des soutènements.
• Mettre en oeuvre diverses mesures d'ingéniérie biologique.

Chutes de pierres et de blocs

Pour se protéger contre les chutes de pierres et de blocs, de même que contre les petits éboulements, les mesures suivantes peuvent être appliquées:

• Clouer ou ancrer des panneaux rocheux.
• Etayer ou soutenir des panneaux rocheux instables par des pieux ou des dispositifs similaires.
• Recouvrir le versant de filets contre les chutes de pierres.
• Mettre en oeuvre du béton projeté (comme protection contre l'altération).
• Purger les parois rocheuses.
• Dynamiter les panneaux rocheux instables.
• Construire des digues d'interception ou de déviation.
• Placer des filets de protection contre les chutes de blocs.

Coulées de terre

En cas de coulées de terre, les mesures de protection consistent surtout à empêcher le développement de surfaces d'érosion «ouvertes» (sans végétation) et à les contrôler par la mise en oeuvre de géotextiles ou de mesures d'ingéniérie biologique sur la zone à l'origine du phénomène. A proximité des objets menacés, on peut envisager une déviation de la coulée par un prisme de terre ou des remblais.

Cette palette de mesures techniques n'est en aucun cas complète. De cas en cas d'autres mesures peuvent s'avérer indiquées. En général, les mesures ne sont efficaces que si leur fonctionnalité est contrôlée périodiquement et qu'elles font l'objet de travaux d'entretien (p.ex. nettoyage des filets de protection entre les chutes de blocs, remise en état des freins des filets d'interception, nettoyage des fossés drainants et des réseaux de drainage).

Des mesures techniques ponctuelles peuvent être renforcées par d'autres mesures de protection, comme par exemple les soins aux forêts protectrices ou l'entretien des cours d'eau.

Les mesures techniques doivent être projetées par un spécialiste expérimenté dans le domaine et leur exécution doit être surveillée par ce dernier.



Kellerhals+Haefeli SA, filets contre les chutes de pierres

Mesures d'urgence et de sauvetage

De même qu'une protection contre l'incendie ne peut remplacer les pompiers, les mesures de protection préventives ne permettent pas d'exclure tous les risques. Afin de limiter les risques résiduels, ou d'empêcher le pire lors d'un événement dépassant toutes les attentes, il faut mettre en oeuvre des systèmes d'alerte et des dispositifs d'alarme adéquats, ainsi que suffisamment de personnes et de moyens matériels prêts à entrer en fonction, pour que les mesures de sauvetage soient efficaces. Les moyens techniques modernes, hélicoptères, liaisons radio, systèmes d'alarme, machines de chantier lourdes, permettent d'apporter rapidement une aide plus efficace qu'au cours des siècles passés.



Henzen, habitation détruite par un bloc

Assurances

Une assurance pour les dommages liés aux éléments naturels n'est pas une mesure en faveur de la diminution des dommages, mais une prestation de solidarité de la communauté. Les assurances sont en fait, comme les mesures de sauvetage, un moyen de pouvoir vivre avec le danger résiduel. **Le principe de solidarité** repose sur la répartition du coût des dommages entre le plus grand nombre de personnes; il est certainement approprié pour les grands événements (écroulements, grands éboulements, grands glissements).

Dans ces cas, la prestation de prévoyance nécessaire excède les possibilités d'un individu, et la rareté de l'événement le situe au-delà de l'expérience personnelle. Au contraire, la prévention des petits événements fréquents met à contribution la **responsabilité individuelle.** Les assurances peuvent contribuer activement à la réduction du potentiel de dommages, en excluant la couverture ou en la limitant, là où le preneur d'assurance fait encourir des risques excessifs, ou en la faisant dépendre de conditions particulières. L'appel à la responsabilité individuelle en vue d'une affectation appropriée au risque n'a pas de sens, dès lors que les assurances couvrent tous les dommages au moment où un événement se produit.

Mesures institutionnelles

Dans plusieurs cantons (p. ex. Fribourg, Grisons, St-Gall), une commission des dangers naturels a été constituée et s'est avérée très utile. Ces commissions constituent des groupes interdisciplinaires de spécialistes. Elles sont notamment compétentes pour l'établissement et la mise à jour des cartes de dangers et en assurent, en tant qu'organe de conseil, la mise en application.

Les commissions des dangers se cantonnent en général à jouer un rôle d'organe de consultation et à formuler des propositions. En aucun cas, elles ne sont habilitées à rendre des jugements ou des décisions administratives. Dans de telles commissions, tous les services concernés par les dangers naturels et leur transposition dans l'aménagement devraient être représentés: le service des eaux, le service des forêts, le service de l'aménagement du territoire, le service des constructions, l'assurance des bâtiments et les représentants des communes concernées.

Les tâches principales envisageables pour une commission des dangers sont les suivantes:

- surveillance, expertise et coordination lors de l'établissement et de la mise à jour des cartes de dangers (et au besoin des cadastres de dangers);
- consultation lors de la transposition des données relatives aux dangers dans le plan directeur et le plan d'affectation;
- conseil aux autorités et aux offices ainsi que, si elle existe, à l'assurance cantonale des bâtiments;
- examen des plans des zones de danger.

Parallèlement, les commissions des dangers naturels peuvent prendre en charge d'autres tâches:

- examen de projets de construction dans les zones de danger;
- élaboration et garantie des principes de base pour l'engagement des moyens publics en vue de la protection contre les dangers naturels;
- soutien des autorités compétentes lors de catastrophes naturelles;
- garantie des échanges d'information au sein de l'administration;
- relations publiques.

Annexes

Méthodes de calcul

Les méthodes d'analyse qui modélisent soit l'équilibre des masses instables, soit leurs mouvements, correspondent à des hypothèses et nécessitent des données paramétriques précises. Chaque modélisation ne livre donc des résultats significatifs que lorsque les données de base sont plausibles et que les hypothèses formulées sont réalistes. Il faut prendre garde au fait que des généralisations trop grossières et simplificatrices peuvent bien conduire à des résultats concrets, mais qui ne sont pas nécessairement significatifs.

On distingue deux catégories de calculs:

- **Les calculs statiques,** en général en 2-D (modèle bi-dimensionnel selon un profil en long de la pente), correspondent à un état d'équilibre limite. Ils donnent un coefficient de sécurité au glissement (par méthodes déterministes, avec des paramètres fixes) ou une probabilité de rupture globale (méthodes probabilistes, avec des paramètres variables). Ils s'appliquent surtout aux phénomènes potentiels (non déclarés) et peuvent traduire la sensibilité d'un massif à la variation de certains paramètres ou à la mise en oeuvre de travaux d'assainissement.
- **Les calculs dynamiques** décrivent les mouvements de la masse ou des blocs dans le temps et dans l'espace. Les seuls modèles valables sont ceux qui traitent des données en trois dimensions (3-D). Le choix des paramètres à introduire est délicat, faute de valeurs de références fiables.

Documents de base

Les données suivantes sont indispensables pour appliquer une méthode de calcul:

- **Données géométriques:** topographie de surface de la zone instable ou exposée et données de déplacement dans le passé.
- **Données géologiques:** délimitation de la masse instable active ou potentielle, y compris détermination et modélisation de la surface de glissement, localisation des fissures et fractures du massif rocheux.

• **Données hydrauliques:** niveau piézométrique, valeurs des pressions, conditions d'alimentation et d'écoulement, degré de saturation dans la zone non saturée.
• **Données géotechniques:** paramètres de résistance (angle de frottement interne, cohésion et poids volumique); paramètres de viscosité; fissuration du rocher avec espacement et persistance; caractéristiques du rebond lors de l'impact d'un bloc sur le sol.
• **Données environnementales:** facteurs de couverture (forêts, nature du sol), facteurs anthropiques et utilisation du sol (déboisement, drainage, excavation, exploitation des zones alpines).

Calculs statiques des glissements de terrain

Les méthodes appliquées ont des degrés de raffinement variables et incluent des hypothèses restrictives. Les principales méthodes donnant les conditions d'équilibre de la pente sont celles de Fellenius, Bishop, Janbu et Morgenstern & Price. L'équilibre théorique est assuré si le facteur de sécurité Fs obtenu est supérieur à 1, soit lorsque les forces résistantes sont supérieures aux forces motrices.

Toutefois, dans la pratique, des mouvements peuvent apparaître si Fs est inférieur à 1.1 – 1.2. Un facteur de sécurité au glissement inférieur à 1, qui indique que les forces motrices sont supérieures aux forces résistantes, n'a pas beaucoup de sens.

Calculs dynamiques des glissements de terrain

Diverses approches ont été développées pour tenir compte des déformations de la masse instable. On peut décrire le mouvement au cours du temps d'une masse de faible épaisseur sur une pente (épaisseur = 1/10e de la longueur) par glissement et/ou fluage. On peut aussi prendre en compte, dans un modèle pseudo-statique, la déformation des éléments, dépendant des efforts qu'ils subissent.

Ces méthodes peu courantes nécessitent des paramètres difficiles à acquérir ou à évaluer, ainsi que des données du passé permettant de calibrer les modèles. Elles sont cependant nécessaires lorsque l'on veut savoir par exemple comment un glissement va barrer le lit d'une rivière.

Analyse des éboulements et des chutes de pierres et de blocs

Il existe peu de méthodes décrivant la chute d'une masse, en dehors des analyses globales d'angle de pente ("Pauschalgefälle") ou de perte d'énergie. L'éboulement d'une masse granulaire sur une pente peut être décrite en 2-D en supposant un matériau incompressible. Toutefois, l'étalement de cette masse au pied du versant peut beaucoup varier selon l'évolution du mécanisme d'initiation (déclenchement par phases).

La plupart des modèles dynamiques disponibles traitent de la chute de blocs isolés. La trajectoire en 3-D peut tenir compte des conditions de rebond (choc élastique ou inélastique), de la forme des blocs (qui peuvent rouler ou glisser) et de la rugosité du sol.

D'autres modèles introduisant des hypothèses plus simples (p.ex. masse concentrée en un point) sont aussi applicables. Tous ces modèles supposent que la masse du bloc, déterminée au départ, reste constante jusqu'à la fin de la trajectoire, ce qui n'est pas souvent le cas. Les résultats déterminent une zone au pied de la pente qui peut être atteinte et donnent des informations sur les vitesses, les hauteurs de rebond et l'énergie des blocs lors de leur chute, mais ils ne donnent pas de chiffre sur la fréquence temporelle des impacts.

Coulées de terre

On peut évaluer la sensibilité d'un versant au départ d'une coulée, compte tenu de la résistance au cisaillement des matériaux et des conditions météorologiques. Mais souvent les matériaux entraînés avaient déjà été mobilisés lors d'une coulée précédente, de sorte que l'observation (notamment géologique) sur place joue un grand rôle pour déterminer les zones de départ possibles et les masses en jeu. Beaucoup de modèles existent pour décrire l'écoulement et le dépôt des coulées; mais ils sont souvent difficiles à appliquer, en ce qui concerne la sélection des paramètres.

Bases légales

Les recommandations pour la prise en compte des dangers dus aux mouvements de terrain dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire s'appuient sur une série de lois fédérales et sur les ordonnances correspondantes:

Loi fédérale sur l'aménagement du territoire du 22 juin 1979 (LAT, RS 700)

Article premier Buts
[1] Ils [La Confédération, les cantons et lescommunes] veillent à assurer une utilisation mesurée du sol. [...] Dans l'accomplissement de leurs tâches, ils tiennent compte des données naturelles ainsi que des besoins de la population et de l'économie.

Art. 6 Etudes de base
[2] Ils [les cantons] désignent les parties du territoire qui:
c. sont gravement menacées par des forces naturelles ou par des nuisances.

Art. 18 Autres zones et territoires
[1] Le droit cantonal peut prévoir d'autres zones d'affectation.

Loi fédérale sur l'aménagement des cours d'eau du 21 juin 1991 (LACE, RS 721.100)

Art. 3 Mesures à prendre
[1] Les cantons assurent la protection contre les crues en priorité par des mesures d'entretien et de planification.
[2] Si cela ne suffit pas, ils prennent les autres mesures qui s'imposent telles que corrections, endiguements, réalisation de dépotoirs à alluvions et de bassins de rétention des crues ainsi que toutes les autres mesures propres à empêcher les mouvements de terrain.

Art. 6 Indemnités afférantes aux mesures de protection contre les crues
[1] [...] la Confédération accorde aux cantons des indemnités pour les mesures de protection contre les crues, notamment pour:
b. l'établissement de cadastres et de cartes des dangers, [...]

Ordonnance sur l'aménagement des cours d'eau du 2 novembre 1994 (OACE, RS 721.100.1)

Article premier Conditions préliminaires
[2] En principe, aucune indemnité n'est accordée pour des mesures visant à protéger des ouvrages et des installations aménagés dans des zones désignées comme dangereuses ou sur des territoires réputés dangereux.

Art. 20 Directives
L'office édicte des directives, notamment sur:
b. l'établissement de cadastres et de cartes des dangers.

Art. 21 Zones dangereuses
Les cantons désignent les zones dangereuses et les prennent en considération dans leurs plans directeurs et dans leurs plans d'affectation ainsi que dans d'autres activités ayant des effets sur l'organisation du territoire.

Art. 22 Surveillance
Les cantons analysent périodiquement les dangers découlant des eaux et l'efficacité des mesures mises en oeuvre pour se protéger des crues.

Art. 27 Etudes de base effectuées par les cantons
[1] Les cantons:
b. tiennent un cadastre des dangers;
c. élaborent des cartes des dangers et les tiennent à jour;
e. répertorient les sinistres d'une certaine importance.

Loi fédérale sur les forêts du 4 octobre 1991 (Lfo, RS 921.0)

Article premier But
[2] Elle [la loi] a en outre pour but de contribuer à protéger la population et les biens d'une valeur notable contre les avalanches, les glissements de terrain, l'érosion et les chutes de pierres (catastrophes naturelles).

Art. 19 Protection contre les catastrophes naturelles
Là où la protection de la population ou des biens d'une valeur notable l'exige, les cantons doivent assurer la sécurité des zones de rupture d'avalanches ainsi que des zones de glissement de terrains, d'érosion et de chutes de pierres et veiller à l'endiguement forestier des torrents.

Art. 36 Protection contre les catastrophes naturelles
La Confédération alloue des indemnités [...] pour:
c. l'établissement de cadastres et de cartes des dangers, [...]

Ordonnance sur les forêts du 30 novembre 1992 (Ofo, RS 921.01)

Art. 15 Documents de base
[1] Les cantons établissent les documents de base pour la protection contre les catastrophes naturelles, en particulier les cadastres et cartes des dangers.
[2] Lors de l'établissement des documents de base, les cantons tiennent compte des travaux exécutés par les services spécialisés de la Confédération et de ses directives techniques.
[3] Ils tiennents compte des documents de base lors de toute activité ayant des effets sur l'organisation du territoire, en particulier dans l'établissement des plans directeurs et d'affectation.

Art. 43 Carte de dangers
[1] L'établissement de cadastres et de cartes de dangers [...] seront indemnisés.

Glossaire

Carte de dangers: carte détaillée (échelle: environ 1:10000 à 1:2000) établie rigoureusement sur la base de critères objectifs et scientifiques, avec les indications suivantes pour l'ensemble du territoire et pour chaque zone, à l'intérieur d'un périmètre d'investigation clairement délimité:
• menace ou absence de menace, pour une zone donnée du territoire;
• nature des processus dangereux (type de danger);
• intensité et probabilité d'occurrence (fréquence) prévues du processus concerné.

Carte indicative des dangers: carte d'ensemble (échelle environ 1:50000 à 1:10000) établie selon des critères scientifiques et objectifs, et renseignant sur les problèmes/dangers qui ont été reconnus (identifiés) et localisés, mais qui n'ont pas été analysés et évalués en détail.

Chutes de pierres/de blocs: chutes, rebonds et roulement de pierres isolées (Ø < 50 cm) et de blocs (Ø > 50 cm).

Coulée de terre: déplacement rapide survenant sur des pentes relativement raides, d'un mélange de matériaux solides (sol meuble et couverture végétale) et de beaucoup d'eau, sans que se manifeste ou se développe une surface de glissement.

Danger: condition, circonstance ou processus dont peut résulter un dommage pour l'homme, l'environnement ou les biens.

Documentation des événements: description d'événements démontrés liés à des dangers naturels, établie de façon systématique, structurée et interprétable.

Dommages potentiels: ampleur des dommages possibles.

Eboulement (sens strict): chute de masse rocheuse qui se fragmente, pendant sa chute ou lors des chocs, sous forme de blocs et pierres, et au cours de laquelle les interactions entre les éléments n'ont pas d'influence déterminante sur la dynamique du processus.

Ecroulement: chute d'une masse rocheuse de très grand volume à partir d'un massif rocheux plus ou moins cohérent, atteignant de grandes vitesses, et au cours de laquelle le mécanisme de déplacement est régi par un important effet d'interaction entre les éléments («Sturzstrom»).

Glissement: mouvement vers l'aval d'une partie d'un versant constituée de roche compacte et/ou de terrains meubles le long d'une surface de cisaillement (surface de glissement).

Menace: danger se rapportant très concrètement à une situation précise ou un objet précis.

Mesure active: mesure de protection dont l'effet s'oppose activement au développement de l'événement naturel, en vue de réduire le danger, ou mesure de protection qui modifie sensiblement le déroulement d'un événement ou sa probabilité d'occurrence. En plus des mesures techniques ponctuelles de protection, comme p.ex. les murs de soutènement ou les ancrages, on peut aussi inclure dans cette catégorie les mesures extensives dans le versant, comme les reboisements ou les drainages.

Mesures d'urgence: mesures temporaires, prises en présence d'un danger menaçant, pour le sauvetage des personnes et la protection des biens.

Mesure passive: mesure de protection qui doit conduire à une réduction du dommage, sans influence active sur le déroulement de l'événement naturel (p.ex. mesures d'aménagement du territoire, de protection d'un objet, plan d'urgence).

Plan des zones de dangers: instrument d'aménagement légalement contraignant, basé sur la carte de danger, approuvé par les instances politiques compétentes.

Danger potentiel: somme des facteurs mettant en danger ou à même de causer des dommages dans la région considérée.

Protection d'un objet: protection d'un objet (bâtiment ou aménagement) par un ouvrage disposé sur l'objet, au voisinage de l'objet, ou de manière à détourner la menace.

Risque: grandeur et probabilité d'occurrence d'un dommage possible.

Risque résiduel: risque subsistant après réalisation de toutes les mesures de sécurité prévues.

Bibliographie

Amanti, M., Castaldo, G., Marchionna, G. & Pecci, M. (1992): Classificazioni dei fenomeni franosi. Bolletino del servizio geologico d'Italia, Vol. CXI, tav. 1.

International Union of Geological Sciences, Working Group on Landslides, IUGS (1995): A suggested method for describing the rate of movement of a landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, IAEG 52, 75 - 78.

Kienholz, H. (1995): Gefahrenbeurteilung und -bewertung. Auf dem Weg zu einem Gesamtkonzept. Schweiz. Z. Forstwesen 146/9, 701-725.

Office fédéral de l'économie des eaux/ Office fédéral de l'aménagement du territoire/Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (1997): Prise en compte des dangers dus aux crues dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire. Recommandations, série dangers naturels.

Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage/Office fédéral de l'économie des eaux (1995): Légende modulable pour la cartographie des phénomènes. Recommandations, série dangers naturels.

Office fédéral des forêts/Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches (1984): Directives pour la prise en considération du danger d'avalanches lors de l'exercice d'activités touchant l'organisation du territoire.

Plate, E. (1993): Naturkatastrophen und Katastrophenvorbeugung. Bericht zur IDNDR, Deutsche Forschungsgemeinschaft DFG, 1-550, ISBN 3-527-27028-0.

Rouiller, J.D. & Marro, Ch. (1997): Application de la méthodologie Matterock à l'évaluation du danger lié aux falaises. Eclogae geol. Helv., Vol. 90/3.

Société suisse des Ingénieurs et architectes (SIA) (1989): Norme SIA 160, Actions sur les structures porteuses, Zürich.

WP/WLI (1993): Multilingual Landslide Glossary. Bitech, Richmond, British Columbia.