

> Protection contre les dangers dus aux mouvements de terrain

Aide à l'exécution concernant la gestion des dangers dus aux glissements de terrain, aux chutes de pierres et aux coulées de boue



> Protection contre les dangers des mouvements de terrain

*Aide à l'exécution concernant la gestion des dangers dus aux
glissements de terrain, aux chutes de pierres et aux coulées de boue*

Valeur juridique de cette publication

La présente publication est une aide à l'exécution élaborée par l'OFEV en sa qualité d'autorité de surveillance. Destinée en premier lieu aux autorités d'exécution, elle concrétise des notions juridiques indéterminées provenant de lois et d'ordonnances, favorisant ainsi une application uniforme de la législation. Si les autorités d'exécution en tiennent compte, elles peuvent partir du principe que leurs décisions seront conformes au droit fédéral. D'autres solutions sont aussi licites dans la mesure où elles sont conformes au droit en vigueur. Les aides à l'exécution de l'OFEV (aussi appelées jusqu'à présent directives, instructions, recommandations, manuels, aides pratiques) paraissent dans la collection «L'environnement pratique».

La présente aide à l'exécution remplace les recommandations intitulées «Prise en compte des dangers dus aux mouvements de terrain dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire» (OFAT, OFEE, OFEFP 1997).

Impressum

Éditeur

Office fédéral de l'environnement (OFEV)
L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Auteurs

Hugo Raetzo et Bernard Loup (division Prévention des dangers, OFEV)

Suivi scientifique

Christophe Bonnard, PBBG SA, Lausanne (ancien collaborateur scientifique de l'EPFL)
Hans Rudolf Keusen, GEOTEST
Arthur Sandri, division Prévention des dangers, OFEV

Groupe de travail des cantons en 2015 (refonte du texte)

Daniel Bollinger, canton de Schwyz
Christophe Dénervaud, canton de Neuchâtel
Lukas Eggimann, canton d'Uri
Jörg Häberle, canton de Berne
Nils Hählen, canton de Berne
Andreas Huwiler, canton des Grisons
Raphaël Mayoraz, canton du Valais
Andrea Pedrazzini, canton du Jura

Contributions à la rédaction

Gian Reto Bezzola, division Prévention des dangers, OFEV
Thomas Egli, Egli Engineering AG
Werner Gerber, WSL
Mark Govoni, division Droit, OFEV
Christoph Haemmig, GEOTEST (ancien collaborateur de l'OFEV)

Relecture de la version allemande

Roland Wyss, Dr. Roland Wyss GmbH

Traduction

Christian Marro, 1997 Haute-Nendaz

Référence bibliographique

OFEV 2016: Protection contre les dangers dus aux mouvements de terrain. Aide à l'exécution concernant la gestion des dangers dus aux glissements de terrain, aux chutes de pierres et aux coulées de boue. Office fédéral de l'environnement, Berne. L'environnement pratique n° 1608: 98 p.

Graphisme, mise en page

Stefanie Studer, 5444 Künten

Photo de couverture

Maison détruite en 1994 par le glissement de terrain de Falli Hölli (commune de Plasselb, canton de Fribourg; photo Hugo Raetzo)

Commande de la version imprimée et téléchargement au format PDF

OFCL, Diffusion des publications fédérales, CH-3003 Berne
Tél. +41 58 465 50 50
verkauf.zivil@bbl.admin.ch
Numéro de commande: 810.100.099f
www.bafu.admin.ch/uv-1608-f

Impression neutre en carbone et faible en COV sur papier recyclé.

Cette publication est également disponible en allemand et en anglais.

© OFEV 2016

> Tables des matières

Abstracts	5		
Avant-propos	7		
Résumé	8		
<hr/>			
1 Bases légales et conception	10		
1.1 Introduction	10		
1.2 Bases légales	10		
1.3 Conception de la nouvelle aide à l'exécution	11		
<hr/>			
2 Analyse de la situation	14		
2.1 Utilisation du territoire	14		
2.2 Processus traités	15		
2.3 Bases et documentation	15		
2.3.1 Documents de base et méthodes	15		
2.3.2 Cadastre des événements naturels	16		
2.3.3 Cadastre des ouvrages de protection	17		
2.3.4 Carte des phénomènes	18		
2.4 Effets des mesures de protection existantes	20		
2.4.1 Prise en compte des ouvrages de protection dans l'évaluation des dangers	20		
2.4.2 Prise en compte des mesures d'organisation dans l'évaluation des dangers	21		
2.5 Exigences à satisfaire lors de l'évaluation des dangers	22		
2.6 Produits cartographiques liés aux dangers	24		
2.6.1 Carte indicative des dangers	25		
2.6.2 Carte des intensités	26		
2.6.3 Carte des dangers	27		
2.7 Évaluation des dangers au moyen du diagramme intensité-probabilité	29		
2.8 Critères d'évaluation de la probabilité	31		
2.8.1 La probabilité d'occurrence des processus de chute	33		
2.8.2 La probabilité d'occurrence des processus de glissement	33		
2.8.3 La probabilité d'occurrence des processus d'écoulement	35		
		2.9 Critères d'évaluation de l'intensité	38
		2.9.1 Intensités et types de dommages pouvant être liés aux processus de chute	42
		2.9.2 Intensités et types de dommages pouvant être liés aux processus de glissement	42
		2.9.3 Intensités et types de dommages pouvant être liés aux processus d'écoulement	43
		2.10 Définition de scénarios	44
		2.10.1 Élaboration des scénarios	44
		2.10.2 Choix des scénarios	44
		2.11 Gestion des incertitudes	45
<hr/>			
3 Besoin d'agir	47		
3.1 Détermination des risques	47		
3.2 Niveau de sécurité et objectifs de protection	48		
3.3 Risque résiduel	50		
<hr/>			
4 Mesures	52		
4.1 Optimisation des mesures de protection	52		
4.2 Phases de planification	55		
4.3 Entretien des ouvrages	55		
4.4 Mise en œuvre en matière d'aménagement du territoire	57		
4.5 Soins aux forêts de protection et mesures sylvicoles	59		
4.6 Mesures constructives pour contrer les processus de chute	59		
4.7 Mesures constructives pour contrer les processus de glissement	61		
4.8 Mesures constructives pour contrer les processus d'écoulement	64		
4.9 Cas de surcharge	65		
4.10 Mesures d'organisation et plans d'urgence	67		
4.10.1 Systèmes de préalerte	67		
4.10.2 Planification des mesures d'urgence	71		
4.11 Vérification périodique et contrôle d'efficacité	72		
<hr/>			

Annexe	73
A1 Bases légales	73
A2 Identification des types de mouvements de terrain	79
A3 Détermination de la probabilité d'occurrence des processus d'écoulement	87
A4 Transposition des données de base sur les dangers dans l'aménagement du territoire	90
A5 Exemple de matrice des objectifs de protection	92
<hr/>	
Bibliographie	94
Répertoire	97

> Abstracts

This guideline explains the management of landslides, hillslope debris flows and rockfall processes. These natural hazards are identified and evaluated using state-of-the-art methods. The criteria of probability of occurrence and intensity are determined for the compilation of hazard maps. The evaluation of risks, definition of protection objectives and target measures and the determination of the action requirement is necessary for planning. The process to be implemented for the optimisation of measures incorporates the examination of all options for action. These include spatial planning, biological, structural and organisational measures. The evaluation of measures takes technical, economic, ecological and social criteria into account.

Keywords:
landslides,
hillslope debris flows,
rockfall, hazard evaluation,
hazard map,
protective measures

Die Vollzugshilfe erläutert den Umgang mit Rutschungen, Hangmuren und Sturzprozessen. Diese Naturgefahren werden mit modernen Methoden lokalisiert und beurteilt. Bei der Erstellung der Gefahrenkarte werden die Kriterien der Eintretenswahrscheinlichkeit und der Intensität bestimmt. Die Beurteilung von Risiken, die Festlegung von Schutzziele und von Massnahmenzielen sowie die Ermittlung des Handlungsbedarfs sind bei der Planung notwendig. Das Vorgehen bei der Optimierung von Massnahmen umfasst die Überprüfung aller Handlungsoptionen. Dazu gehören raumplanerische, biologische, bauliche und organisatorische Massnahmen. Die Bewertung der Massnahmen berücksichtigt technische, ökonomische, ökologische und soziale Kriterien.

Keywords:
Rutschungen,
Hangmuren, Steinschlag,
Gefahrenbeurteilung,
Gefahrenkarte,
Schutzmassnahmen

Cette aide à l'exécution indique comment traiter les glissements de terrain, les coulées de boue et les processus de chute. Ces dangers naturels sont localisés et évalués en appliquant des méthodes modernes. La carte des dangers est élaborée en tenant compte de la probabilité d'occurrence et de l'intensité des processus dangereux. La planification des mesures à prendre demande d'évaluer les risques, de fixer des objectifs de protection, d'assigner des objectifs aux mesures envisagées et de déterminer les travaux à entreprendre. La méthode préconisée pour optimiser les mesures inclut un examen de toutes les options concevables – mesures d'aménagement du territoire, biologiques, constructives ou d'organisation. Les mesures considérées sont évaluées en tenant compte de critères techniques, économiques, écologiques et sociaux.

Mots-clés:
glissement de terrain,
coulée de boue, chute de pierres,
évaluation des dangers,
carte des dangers,
mesure de protection

L'aiuto all'esecuzione spiega come gestire i scivolamenti, le colate detritiche di versante e i processi di crollo. Questi pericoli naturali vengono localizzati e valutati applicando metodi moderni. Nell'allestimento delle carte dei pericoli si determinano i parametri «probabilità di accadimento» e «intensità». Per la pianificazione delle misure occorre valutare i rischi, definire sia gli obiettivi di protezione che gli obiettivi delle misure e stabilire la necessità d'intervento. L'ottimizzazione delle misure richiede una verifica di tutte le opzioni d'intervento: dai provvedimenti di pianificazione del territorio a quelli edili, biologici e organizzativi. La valutazione delle misure considera criteri tecnici, economici, ecologici e sociali.

Parole chiave:
scivolamenti,
colate detritiche di versante,
caduta sassi,
valutazione dei pericoli,
carta dei pericoli,
misure di protezione

> Avant-propos

La loi sur les forêts a notamment pour but de protéger les personnes et les biens d'une valeur notable contre les avalanches, les glissements de terrain, l'érosion et les chutes de pierres. La présente aide à l'exécution intitulée «Protection contre les dangers dus aux mouvements de terrain» explique comment la mettre en œuvre d'une manière conforme au droit en vigueur. Cette nouvelle aide à l'exécution a été conçue à partir des recommandations fédérales de 1997 intitulées «Prise en compte des dangers dus aux mouvements de terrain dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire», bien établies auprès des milieux spécialisés. Elle en a conservé les principes fondamentaux. L'évaluation des glissements de terrain exploite les résultats de recherches récentes et applique des critères quantitatifs détaillés, comme la variation temporelle de la vitesse de déplacement. Les réactivations et les accélérations occasionnent souvent des dégâts, voire des destructions, c'est pourquoi le cadastre des événements naturels revêt une grande importance. Certaines mesures de gestion des mouvements de terrain, telles que surveillance ou exploitation de services d'alerte, sont aussi détaillées. Quant à la probabilité d'occurrence des coulées de boue, elle est maintenant déterminée en cinq étapes.

L'OFEV a soumis à consultation un projet de la présente aide à l'exécution au cours de l'automne 2009. Puis un groupe de travail composé de représentants de la Confédération et des cantons a remanié ce document en 2015. Les nombreuses réactions qu'il a suscitées ont été intégrées autant que possible dans la présente version finalisée. Cette aide à l'exécution fait partie d'une série de publications de l'OFEV concernant notamment la gestion intégrée des risques et la protection contre les crues. Elle se réfère aussi au document de PLANAT intitulé «Niveau de sécurité face aux dangers naturels» et aux objectifs de protection qu'elle recommande (PLANAT 2013).

Cette aide à l'exécution participe à la mise en œuvre d'une approche préventive et appropriée des dangers dus aux mouvements de terrain. Elle souligne la nécessité de disposer d'une documentation de base et d'appréciations des risques objectives et aisément compréhensibles. La gestion de ces dangers ne peut être exhaustive et durable – au sens de la gestion intégrée des risques – que si toutes les mesures appliquées sont combinées idéalement, en vertu de critères économiques, écologiques et sociaux. C'est pourquoi la planification de la protection doit s'efforcer d'harmoniser au mieux des mesures d'aménagement du territoire, biologiques, constructives et d'organisation.

Josef Hess
Sous-directeur
Office fédéral de l'environnement (OFEV)

> Résumé

Cette aide à l'exécution intitulée «Protection contre les dangers dus aux mouvements de terrain» explique comment traiter les glissements de terrain, les coulées de boue et les processus de chute d'une manière conforme à la loi sur les forêts (LFo). Le chapitre 2 décrit la marche à suivre pour élaborer des documents de base sur les dangers. La fiabilité et l'efficacité des mesures de protection existantes entrent également dans l'évaluation des dangers. Les exigences auxquelles elle est astreinte, qui dépendent du but poursuivi, sont désormais différenciées selon trois degrés. Les projets de construction, les expertises et les études de détail (échelle entre 1:1000 et 1:5000) sont soumis à des impératifs très rigoureux. Les cartes des dangers doivent aussi répondre à des conditions strictes, puisque la précision requise est de l'ordre du décimètre (échelle entre 1:2000 et 1:10000).

Le degré des dangers imputables aux mouvements de terrain est établi à l'aide d'un diagramme intensité – probabilité d'occurrence, à partir d'une analyse des scénarios susceptibles de se réaliser. Cette évaluation vise notamment à déterminer les probabilités d'occurrence annuelles qui correspondent aux périodes de retour appliquées aux crues et aux avalanches. Les classes d'intensité suivantes sont assignées aux processus de chute: faible pour <30 kJ, moyenne pour 30–300 kJ, forte pour >300 kJ. L'évaluation des glissements superficiels et des coulées de boue applique une méthode qui améliore l'analyse de la prédisposition et la détermination de la probabilité d'occurrence. Les glissements permanents sont décrits en trois classes d'intensité dépendant de leur vitesse moyenne (0–2 cm/an, 2–10 cm/an et >10 cm/an). Les accélérations et les déplacements différentiels éventuels sont pris en compte conformément aux enseignements tirés des analyses d'événements passés. L'intensité est ainsi établie en faisant appel à de nouveaux critères: a) accélérations des glissements en fonction de leur vitesse maximale; b) mouvements différentiels; c) profondeur de la surface de glissement. Les coulées de boue sont exprimées par leur épaisseur à la source et par la hauteur de leur dépôt. Les processus d'effondrement et d'affaissement (p. ex. dans une doline) sont évalués lorsque des indices visibles sur le terrain révèlent qu'ils ont une certaine extension.

Le chapitre 3 indique comment déterminer les risques et fixer des objectifs de protection. La Confédération vise à assurer, dans l'ensemble du territoire helvétique, un niveau de sécurité comparable face à tous les dangers naturels qui soit écologiquement acceptable, économiquement proportionné et socialement supportable. Les pouvoirs publics se réfèrent aux objectifs de protection fixés préalablement pour identifier le besoin d'agir. Lorsque la protection est lacunaire, ils étudient si des mesures appropriées sont à même d'atténuer les risques. Les instances responsables assignent des objectifs spécifiques aux mesures planifiées.

Le chapitre 4 traite de la planification, de la conception et de la réalisation des mesures de protection. Toutes les options envisageables sont examinées lors des phases de planification et d'optimisation. Les mesures passives permettent de réduire l'ampleur

des dommages éventuels. Les cantons transposent les cartes des dangers dans toutes les activités ayant une incidence sur l'organisation de leur territoire, notamment lorsqu'ils établissent des plans directeurs et des plans d'affectation. L'aménagement du territoire est privilégié pour diminuer les dommages potentiels. Les mesures actives ont une incidence sur le déroulement des processus. Elles comprennent des mesures surfaciques, telles que soins aux forêts protectrices ou boisements, et des ouvrages ponctuels, tels que filets pare-pierres. Des ouvrages de protection peuvent être réalisés dans les périmètres faisant déjà l'objet d'une utilisation méritant d'être protégée ou dont l'affectation doit impérativement être modifiée après pesée des intérêts en jeu. Mais de telles mesures ne sont pas toujours envisageables contre les mouvements de terrain pour des raisons techniques ou économiques; c'est notamment le cas face aux grandes masses et aux fortes énergies. Lorsqu'une zone menacée ne peut pas être totalement protégée, des systèmes de surveillance, d'alarme et d'alerte sont néanmoins à même d'assurer la sécurité des personnes de manière économique. La surveillance est subdivisée en quatre niveaux, faisant l'objet d'exigences différenciées. Les systèmes de pré-alerte contrôlant l'évacuation de personnes et la fermeture de voies de communication sont soumis à des contraintes rigoureuses.

Les annexes comprennent des explications et des informations techniques nécessaires pour mettre en œuvre les chapitres précédents. L'exposé des bases légales est suivi de définitions et de précisions concernant les mouvements de terrain. D'autres annexes fournissent des renseignements concernant la transposition des données de base dans l'aménagement du territoire et la fixation d'objectifs de protection tenant compte des risques.

1 > Bases légales et conception

1.1 Introduction

Les terrains affectés par des mouvements de terrain connus occupent 6 à 8 % du territoire helvétique, en comptant les glissements actifs actuels et passés. Les Alpes, les Préalpes et certaines parties du Jura figurent parmi les régions les plus touchées. L'importance de ces processus a incité la Confédération à édicter, en 1997, des recommandations intitulées «Prise en compte des dangers dus aux mouvements de terrain dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire» (OFAT et al. 1997). Les cantons ont alors évalué les dangers imputables aux mouvements de terrain qui touchent leur territoire. Forts de leurs expériences, ils ont ensuite adressé à la Confédération des propositions visant à améliorer la méthode. En 2004, le groupe de travail «Danger naturel et géologie» a rédigé un rapport suggérant des perfectionnements basés sur les enseignements tirés de la pratique (AGN 2004). Les analyses des intempéries de 2005 et 2007 ont montré que les réactivations et les accélérations des glissements de terrain ont parfois été sous-estimées par le passé. Les intempéries ont déstabilisé des pentes qui n'avaient jamais été recensées ni évaluées comme potentiellement instables auparavant. Les événements de grande ampleur ont occasionné des dommages directs et apporté des matériaux dans le lit de torrents qui ont ensuite été sujets à des laves torrentielles. L'analyse des glissements superficiels et des coulées de boue a aussi permis de mieux évaluer la prédisposition à ces processus spontanés.

La présente aide à l'exécution s'inscrit dans le prolongement des recommandations «Prise en compte des dangers dus aux mouvements de terrain dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire», publiées conjointement en 1997 par les trois anciens offices fédéraux de l'aménagement du territoire (OFAT), de l'économie des eaux (OFEE) et de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP). Elle en conserve les principes fondamentaux, mais la démarche préconisée implique davantage de données quantitatives. Cette aide à l'exécution vise à établir une unité de doctrine et une évaluation uniforme des dangers dus aux chutes de pierres, aux glissements de terrain, aux coulées de boue et à l'érosion. La Confédération y indique aussi les stratégies de protection envisageables.

1.2 Bases légales

En ce qui concerne les documents de base sur les dangers, la présente aide à l'exécution se réfère à l'art. 15 de l'ordonnance du 30 novembre 1992 sur les forêts (OFo). Cette disposition demande aux cantons d'établir la documentation nécessaire pour assurer la protection contre les catastrophes naturelles, notamment des cadastres des ouvrages de protection, des cadastres des événements, des cartes des dangers et des plans d'urgence (al. 1). Pour cela, ils tiennent compte des travaux exécutés par les services spécialisés de la Confédération et de leurs directives techniques (al. 2). Le

présent document indique aux cantons comment élaborer les documents de base, en particulier les cartes des dangers. Son but est aussi que les menaces générées par les mouvements de terrain de nature géologique soient appréhendées selon des critères et échelles homogènes dans toute la Suisse. Ces critères de portée générale sont transposables aux dangers dus aux crues et aux avalanches. La gestion des dangers naturels se fonde ainsi sur des principes identiques, ce qui assure une mise en œuvre uniforme des lois sur les forêts et sur l'aménagement des cours d'eau lors de l'élaboration des documents de base sur les dangers. Les cantons en tiennent compte dans toutes les activités ayant des effets sur l'organisation du territoire, en particulier dans l'établissement des plans directeurs et des plans d'affectation (al. 3). Sur demande, ils mettent ces documents de base à la disposition de l'Office fédéral de l'environnement et les rendent accessibles au public sous une forme adaptée (al. 4).

Pour les domaines autres que les données de base sur les dangers (chap. 3 et 4), l'aide à l'exécution se fonde sur les compétences générales de l'OFEV en matière de protection contre les mouvements de terrain, qui l'habilite à concrétiser des notions juridiques indéterminées et à favoriser ainsi une application uniforme de la législation.

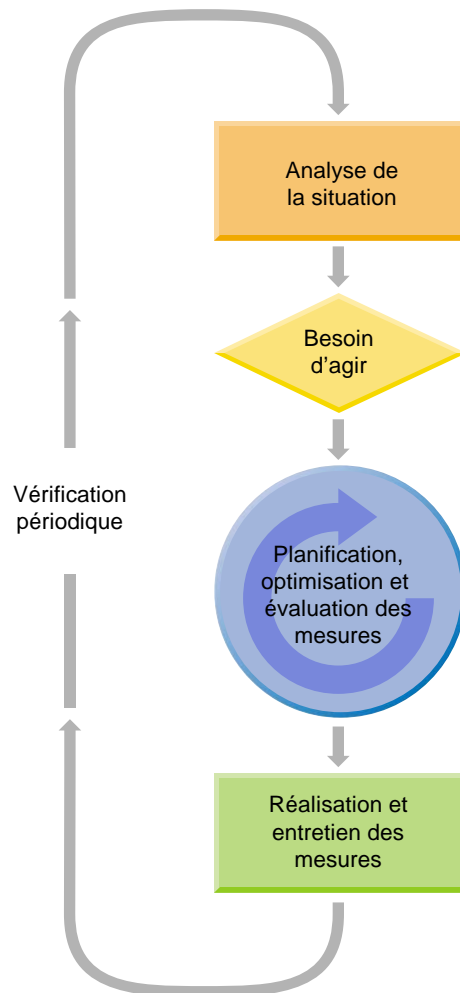
L'annexe A1 présente des extraits des articles de lois et ordonnances déterminants.

1.3

Conception de la nouvelle aide à l'exécution

Cette aide à l'exécution reprend les principes de la gestion des dangers naturels et explique la marche à suivre pour établir les documents de base appropriés (fig. 1). Les exigences à satisfaire et la méthode préconisée sont exposées au chapitre 2 intitulé «Analyse de la situation» (fig. 1). Avant de planifier des mesures, il y a lieu de déterminer le besoin d'agir et de fixer les objectifs de protection (chap. 3 analyse des risques, niveau de sécurité visé, objectifs de protection, objectifs des mesures). Le mandat consistant à protéger les personnes et les biens d'une valeur notable est rempli lorsque des mesures de protection ont été planifiées et réalisées conformément aux indications du chapitre 4. Les chapitres 2 à 4, qui concrétisent des notions juridiques inscrites dans des lois et ordonnances, constituent la partie principale de la présente aide à l'exécution. Les annexes comprennent des explications et des informations techniques complémentaires qui n'ont pas la valeur juridique d'une aide à l'exécution.

Fig. 1 > Procédure de gestion des dangers naturels



La nouvelle aide à l'exécution reprend autant que possible les principes reconnus et précise certaines exigences (procédure générale schématisée à la fig. 1). L'évaluation des dangers, la planification des mesures et leur évaluation sont en principe comparables à la pratique en matière de protection contre les crues – mis à part les caractéristiques des processus considérés.

Les principales nouveautés de l'aide à l'exécution sont les suivantes:

- > Les processus considérés sont définis plus complètement à l'annexe A2. Comme la Suisse subit fréquemment des chutes de pierres, des glissements de terrain et des coulées de boue, les dangers qu'ils génèrent sont évalués en appliquant des définitions et des critères précis. Les combinaisons et les transitions entre phénomènes, courantes dans la nature, sont abordées en distinguant les processus initiaux et secondaires («first move» et «second move»).
- > Les contraintes auxquelles l'évaluation des dangers doit satisfaire dépendent de son but et du statut juridique des résultats qu'elle fournit. C'est pourquoi les exigences

énoncées au chapitre 2 sont différenciées selon trois degrés. Les projets de construction, les expertises et les études de détail sont assujettis à des impératifs très rigoureux. Dans ce cas, l'incertitude doit être la plus faible possible et les éventuels ouvrages à bâtir doivent être dimensionnés le plus exactement possible. À l'échelle des cartes des dangers, pour pouvoir leur conférer un caractère contraignant, les autorités doivent disposer de documents répondant également à des exigences élevées, dont la précision est de l'ordre du décimètre.

- > Les mouvements de terrain sont évalués en examinant les scénarios envisageables. Il y a lieu de déterminer les probabilités d'occurrence annuelles (0,033; 0,01; 0,003; <0,003), qui correspondent aux périodes de retour appliquées aux crues et aux avalanches (30 ans, 100 ans, 300 ans, >300 ans).
- > Le degré des dangers imputables aux mouvements de terrain est déterminé à l'aide d'un diagramme intensité – probabilité d'occurrence. Les glissements permanents sont décrits en trois classes d'intensité correspondant à leur vitesse moyenne. Les accélérations et les mouvements différentiels éventuels sont davantage pris en compte, conformément aux enseignements tirés d'analyses d'événements passés. C'est pourquoi la détermination des intensités fait appel à des critères supplémentaires:
 - accélérations et réactivations des glissements, exprimées par la vitesse maximale lors d'une crise (v_{\max});
 - mouvements différentiels (md): les plus grands dommages surviennent généralement dans les zones sujettes à des déplacements différentiels, car le terrain n'y glisse pas vers l'aval à une vitesse uniforme;
 - profondeur de la surface de glissement (p): il est possible de réduire l'intensité d'un degré à partir d'une profondeur d'une trentaine de mètres lorsque toutes les conditions suivantes sont remplies simultanément: grande masse en glissement d'un seul tenant, secteurs sujets à des phénomènes identiques et dynamique du mouvement attestée uniforme par des mesures géodésiques.
- > Cette aide à l'exécution introduit une nouvelle méthode d'évaluation des glissements superficiels et des coulées de boue. L'étude du contexte géologique et géomorphologique actuel couplée à l'analyse des événements antérieurs fournit des données statistiques qui aident à en déterminer la probabilité d'occurrence.
- > Cette aide à l'exécution précise l'évaluation des dolines, mais n'impose la délimitation d'une zone de danger «rouge» que lorsqu'il y a un danger avéré d'effondrement.
- > Les chutes de glace sont évaluées comme les chutes de pierres.
- > Cette aide à l'exécution pose des principes généralement applicables pour tenir compte des mesures de protection dans l'évaluation des dangers.
- > Les objectifs de protection sont définis en fonction des risques. La sécurité visée doit être élevée lorsque le risque est grand. Les risques faibles ne nécessitent en revanche aucune protection, ou alors le coût des mesures sera modéré (chap. 3).
- > Les mesures envisageables pour assurer la protection contre les dangers dus aux mouvements de terrain sont exposées au chapitre 4 (mesures d'aménagement du territoire, biologiques, constructives ou d'organisation). Cette aide à l'exécution accorde une plus large place aux mesures d'organisation, notamment parce que cette option doit souvent être privilégiée en cas de danger d'éboulement ou de glissement profond.

2 > Analyse de la situation

Les cantons établissent les documents de base nécessaires pour assurer la protection contre les événements naturels (art. 15 OFo). Il faut en premier lieu identifier et évaluer ceux qui sont susceptibles de se produire pour être à même d'éviter ou d'atténuer les risques qu'ils constituent. L'analyse de la situation comprend, d'une part, une appréciation des dangers présents (§ 2.2 à 2.10) et, d'autre part, un recensement des affectations du sol et des constructions existantes et planifiées (§ 2.1). La superposition des documents décrivant les dangers et les affectations du sol indique les périmètres dans lesquels des personnes, des biens, des infrastructures et d'autres objets pourraient être touchés par des phénomènes naturels.

Le niveau de détail de l'analyse peut varier largement, selon le problème et l'objectif posés, en fonction du périmètre examiné (Suisse, canton, région, commune, projet) ou de la documentation disponible (nature, échelle, contenu, etc.).

2.1 Utilisation du territoire

Les affectations du sol et les catégories d'objets sont subdivisées plus ou moins finement d'après le niveau de détail requis par la tâche à accomplir. Les vues d'ensemble de vastes systèmes se satisfont de regroupements, par exemple selon les catégories de biens à protéger suivantes:

- > personnes
- > bâtiments
- > infrastructures usuelles (p. ex. voies ferrées ou routes) et vitales («lifelines»)
- > biens culturels
- > objets particuliers

La planification de mesures de protection requiert généralement un inventaire précis de la situation, recourant par exemple à EconoMe. Cet état des lieux est dressé en subdivisant plus finement les affectations du sol et les objets concernés, et en ajoutant certaines précisions si nécessaire.

Pour obtenir une vue d'ensemble des dommages potentiels, afin d'appréhender leur évolution possible et celle des risques qui va de pair, il faut considérer, quel que soit le degré de précision de l'étude, non seulement les affectations existantes, mais aussi les développements prévus ou prévisibles. Les plans d'affectation – et les plans directeurs communaux lorsqu'ils existent – fournissent des indications au sujet des développements à venir. On peut également consulter, entre autres, les plans sectoriels de la Confédération, les plans directeurs des cantons et les concepts de développement cantonaux et régionaux.

2.2 Processus traités

La loi fédérale sur les forêts a notamment pour but de contribuer à protéger la population et les biens d'une valeur notable contre les glissements de terrain, l'érosion et les chutes de pierres (art. 1, al. 2, LFo). La présente aide à l'exécution concernant les dangers dus aux mouvements de terrain traite:

- > les processus de chute: chute de pierres, chute de blocs, éboulement, écroulement, chute de glace et effondrement
- > les processus de glissement: glissement de terrain et tassement
- > les processus d'écoulement: coulée de boue

Les coulées de boue sont expliquées dans ce document. Les laves torrentielles sont abordées dans celui qui traite des dangers liés aux crues (OFEE et al. 1997). On s'intéresse particulièrement aux successions et aux combinaisons de processus (p. ex. glissements de terrain, coulées de boue et laves torrentielles), car les mouvements de terrain sont souvent très éloignés des objets susceptibles d'être endommagés.

L'annexe A2 définit les mouvements de terrain considérés. Les avalanches sortent du cadre de cette aide à l'exécution.

2.3 Bases et documentation

Le traitement des dangers imputables aux mouvements de terrain requiert, dans une première phase, une documentation neutre incluant tous les renseignements, observations et mesures disponibles qui signalent l'existence d'une menace. Au stade de l'identification des dangers, les observations consignées doivent être aussi objectives, aussi peu interprétées que possible. Il est impératif de préciser la qualité des informations, qu'elles résultent d'estimations, de calculs ou de mesures. L'identification des dangers met en œuvre toute une panoplie de sources et de méthodes. Les événements passés et les «témoins muets» fournissent des indications importantes, même si des ouvrages de protection ont été réalisés dans l'intervalle.

2.3.1 Documents de base et méthodes

Les documents de base et les méthodes servant à élaborer les cartes des dangers sont brièvement décrits ici (voir les § 2.3.2–2.3.4 concernant le cadastre des événements naturels, le cadastre des ouvrages de protection et la carte de phénomènes).

L'analyse topographique est l'un des volets d'une étude exhaustive, qui recourt aussi aux orthophotos, aux modèles numériques de terrain, aux données fournies par la télédétection et aux cartes thématiques. Les modèles numériques de terrain permettent notamment de générer des cartes de déclivité et des représentations du relief (avec ombrage, «hillshade») utilisables pour élaborer des cartes géomorphologiques lorsque leur résolution est élevée.

La télédétection englobe toutes les méthodes mises en œuvre à distance depuis l'espace, les airs ou le sol. Elle applique diverses méthodes physiques:

- > images optiques
- > images radar (micro-ondes)
- > images laser (LIDAR)

Ces images peuvent être prises depuis un satellite, depuis les airs (p. ex. à partir d'un avion, d'un hélicoptère ou d'un drone) ou depuis le sol.

La mensuration englobe diverses méthodes classiques et modernes utilisées pour examiner les déplacements du sol (p. ex. GPS, tachymètre). Dans le domaine des instabilités de terrain, elles sont toutes mises en œuvre afin de mesurer les déplacements et de déterminer leur vitesse.

La carte géologique est un élément important de la cartographie des mouvements de terrain. Elle en distingue différentes formes comme les glissements et les tassements.

L'eau joue un rôle important dans les mouvements de terrain gravitaires. C'est pourquoi il faut connaître les conditions hydrogéologiques et hydrologiques régnant dans le bassin versant.

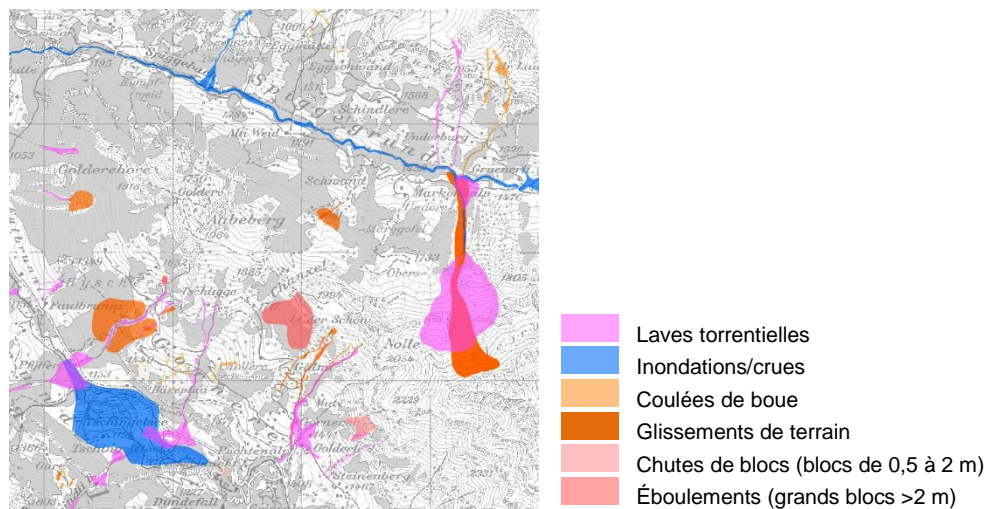
Les forages peuvent être réalisés par carottage ou sous forme destructrice (à l'air ou à l'eau). Le carottage est la seule méthode permettant de déterminer sûrement la nature de la roche en profondeur et ses caractéristiques géotechniques. Les trous de forage peuvent être équipés d'inclinomètres, extensomètres, piézomètres ou autres. Un inclinomètre est capable d'identifier avec certitude une surface de glissement active se trouvant à grande profondeur et de mesurer le mouvement à son niveau.

2.3.2 Cadastre des événements naturels

Qui veut prévoir doit s'intéresser au passé. Les secteurs sujets à un processus et les témoignages consignés dans un cadastre des événements naturels fournissent des indications précieuses lorsqu'il s'agit de délimiter les périmètres potentiellement menacés. Ils aident à estimer les périodes de retour, à définir les scénarios et à étalonner les simulations. Les événements documentés servent aussi à établir des vues d'ensemble des dommages.

Les cadastres des événements naturels sont tenus et mis à jour régulièrement par les services cantonaux spécialisés. La Confédération fournit des formulaires standard pour relever les avalanches, les processus de chute, les glissements de terrain, les phénomènes hydrauliques, les effondrements et les affaissements. Les informations saisies sont gérées d'une manière centralisée dans la base de données StorMe, accessible sur Internet. Les événements sont représentés spatialement. Sont en tout cas documentés les processus déterminants, leur zone d'influence, la date de leur occurrence et l'ampleur approximative des dommages qu'ils ont causés. Le contexte météorologique est mentionné facultativement. Les enregistrements peuvent avoir différents niveaux de détail (voir également l'encadré sur la modélisation des données).

Fig. 2 > Cadastre des événements naturels



géoportail du canton de Berne, www.apps.be.ch/geo

2.3.3 Cadastre des ouvrages de protection

Au cours des dernières décennies, de nombreuses localités et infrastructures de transport ont été sécurisées en érigeant des ouvrages stabilisateurs dans la zone de rupture ou des ouvrages protecteurs dans la zone de transit ou de dépôt. Pour garantir la pérennité de leur efficacité, il faut organiser des contrôles réguliers (de la sécurité structurale et de l'aptitude au service) et des travaux d'entretien.

Le cadastre des ouvrages de protection facilite grandement leur gestion. Il contient notamment des informations concernant le type, l'emplacement, l'état, l'âge et les dimensions des ouvrages répertoriés. Le système permet aussi d'enregistrer des données relatives aux biens protégés ainsi que le nom du maître de l'ouvrage, le coût de sa construction, le plan d'entretien, les compétences, etc. La Confédération a fixé des principes et des exigences minimales portant sur le contenu, la structure et la tenue des cadastres des ouvrages de protection. Les services cantonaux spécialisés collectent les données nécessaires et tiennent leur cadastre constamment à jour (voir également l'encadré sur la modélisation des données).

Fig. 3 > Filet pare-pierres

OFEV

2.3.4 Carte des phénomènes

La carte des phénomènes recense les caractéristiques et les indicateurs géologiques et géomorphologiques observés sur place. L'analyse de terrain est un complément important de la documentation des événements. Elle consiste essentiellement à cartographier des faits, mais elle comprend aussi les interprétations objectives nécessaires. Elle sert à identifier et à estimer les types de dangers possibles (prédisposition, mécanismes de déclenchement, modes d'action). La carte des phénomènes est élaborée indépendamment d'un quelconque degré de danger, qui sera déterminé ultérieurement.

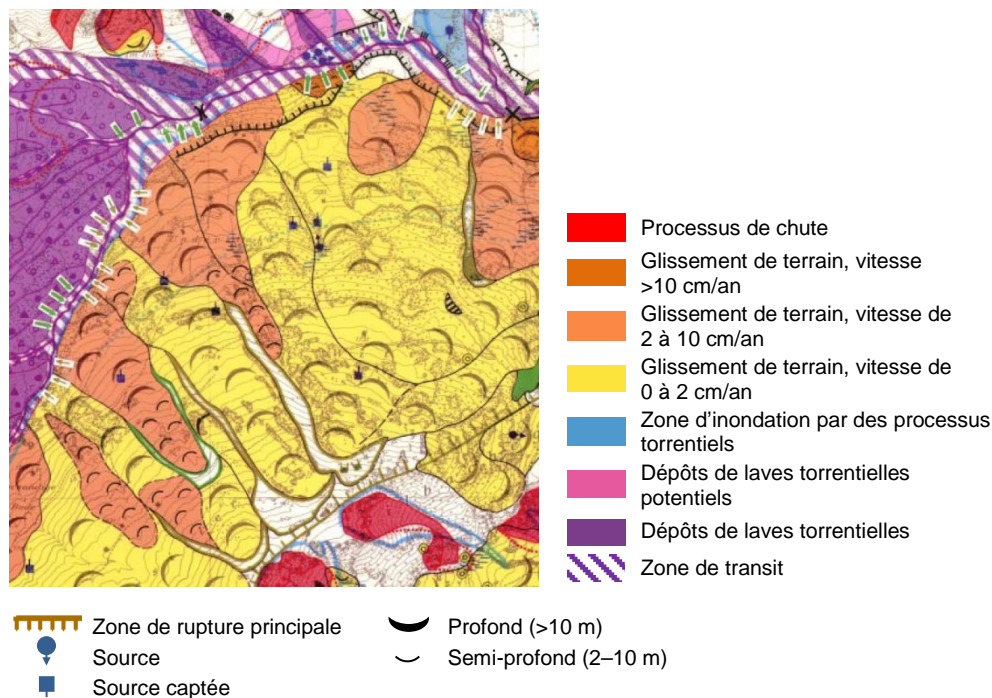
L'analyse de terrain se fonde sur l'observation et l'interprétation des formes du terrain, de la végétation, des conditions hydrauliques et des «témoins muets» de processus dangereux antérieurs ou actuels (p.ex. blocs éboulés). Elle permet souvent d'établir la cause, la probabilité d'occurrence et d'autres paramètres importants des événements (p.ex. pour définir les scénarios).

Les processus dangereux et leurs manifestations sont relevés et représentés au moyen d'une légende uniforme, développée spécialement à cet effet (Légende modulable pour la cartographie des phénomènes, OFEE et OFEFP 1995).

- > Échelle: 1:2000 à 1:25 000 selon l'usage prévu.
- > Mise à jour ou vérification: lorsque la situation de danger a changé et que la carte des dangers est révisée.

Fig. 4 > Carte des phénomènes

Exemple réalisé en appliquant la légende modulable. La légende de la figure ne reprend qu'une partie des symboles utilisés, notamment ceux qui sont pertinents pour les glissements de terrain.



Modélisation des données et publication des documents de base sur les dangers

Les cantons rendent les documents de base accessibles au public sous une forme adaptée afin que les intéressés directs et l'ensemble de la population soient informés aussi bien que possible de la situation de danger (art. 15, al. 4, OFo).

Pour être à même de traiter et d'échanger les informations saisies le plus simplement possible, il faut décrire les géodonnées et les jeux de données d'une manière minutieuse et compréhensible. Leur structure et leur contenu doivent satisfaire à certaines exigences minimales. En outre, la loi fédérale sur la géoinformation (LGéo, RS 510.62) et l'ordonnance sur la géoinformation (OGéo, RS 510.620) qui en découle chargent les offices fédéraux compétents d'établir des modèles de données minimaux d'entente avec les cantons (art. 66a OFo). L'annexe 1 de l'OGéo comprend un catalogue des géodonnées de base relevant du droit fédéral. En vertu de cela, les jeux de géodonnées suivants, publiés à l'adresse www.bafu.admin.ch/geodatenmodelle [FR], doivent être modélisés:

- > «Cadastré des dangers», doté de l'identificateur 167.1 (correspond au cadastre des événements naturels selon le § 2.3.2)
- > «Cadastré des ouvrages de protection contre les crues», doté de l'identificateur 81.2 (correspond au cadastre des ouvrages de protection et inclut les données relevant du cadastre qui concernent tous les processus dangereux selon le § 2.3.3)

Pour élaborer ces produits, les cantons doivent tenir compte des modèles de données définis par la Confédération. Ils comprennent deux parties: le «modèle de données minimal» selon la législation sur la géoinformation, qui revêt un caractère obligatoire, et le «modèle de données étendu», qui a valeur de recommandation.

Pour en savoir plus

- > *Légende modulable pour la cartographie des phénomènes (OFEE et OFEFP 1995)*
- > *Modèles de géodonnées: www.bafu.admin.ch/geodatenmodelle [FR]*

2.4 Effets des mesures de protection existantes

Les forêts protectrices, les ouvrages de protection et les mesures d'organisation comptent parmi les mesures de protection existantes. L'incidence des forêts protectrices doit être prise en compte dans l'évaluation des dangers et documentée dans le rapport technique (p. ex. en appliquant la méthode Protect-Bio).

Des ouvrages de protection sont érigés pour assurer la défense contre les processus naturels en diminuant leur intensité ou leur probabilité d'occurrence. Mais les risques encourus par les personnes et par les biens ne sont réduits durablement que si les ouvrages et autres mesures de protection mis en œuvre ont l'effet escompté lors d'un événement. Leur fonctionnement doit être assuré tout au long de leur durée de vie prévue. L'évaluation de leurs effets tiendra compte de ce qui se passe en cas de surcharge. Face à cette situation, leur entretien revêt un caractère prioritaire et requiert une organisation efficace à long terme.

Les ouvrages de protection sont sujets à une usure continue, si bien que leur état doit être examiné régulièrement, en particulier à l'issue d'un événement. De nombreux ouvrages construits au XIX^e siècle et au début du XX^e arrivent en fin de vie et doivent être renouvelés. De plus, le dimensionnement de nombreux ouvrages existants a été réalisé sur la base de connaissances et d'expériences datant d'une période plutôt épargnée par les événements extraordinaires (entre 1927 et 1977).

2.4.1 Prise en compte des ouvrages de protection dans l'évaluation des dangers

Les ouvrages de protection ne peuvent être pris en compte dans l'évaluation des dangers que si leur fiabilité est avérée, car cela peut influencer la transposition des dangers dans l'aménagement du territoire et le dimensionnement des nouveaux ouvrages. Les effets de ces mesures sont évalués en trois étapes:

- > évaluation sommaire: elle comprend une estimation de l'importance des ouvrages de protection (effet pertinent ou non) et permet de décider s'il y a lieu de procéder à une évaluation détaillée;

- > évaluation de la fiabilité: elle tient compte de la sécurité structurale, de l'aptitude au service et de la durabilité des ouvrages (voir encadré au § 2.4.2);
- > évaluation de l'effet: elle quantifie l'incidence des ouvrages sur le déroulement des processus en examinant plusieurs scénarios qui impliquent diverses intensités et probabilités d'occurrence.

Les ouvrages de protection doivent déployer en permanence (pendant 50 ans) des effets quantifiables avec une marge de sécurité appropriée. La prise en compte des mesures de protection présuppose que le système dans son ensemble et chaque ouvrage en particulier soient entretenus. Il y a lieu de réexaminer périodiquement l'état des ouvrages et la situation de danger. Ils peuvent aussi faire l'objet d'une surveillance (voir § 4.10). Un ouvrage qui présente des carences perd de son efficacité et peut même induire des dangers supplémentaires. Un seul élément inapte au service peut déjà diminuer la protection offerte. La situation est critique lorsque la défaillance d'un seul élément compromet le fonctionnement de tout un système.

Les principes suivants s'appliquent par ailleurs:

- > Si les effets d'une mesure sur un processus donné sont moindres que les incertitudes entourant l'évaluation de ce processus, la mesure considérée n'est pas prise en compte.
- > Quatre scénarios sont en principe examinés: trois correspondent à des événements de probabilité d'occurrence élevée, moyenne et faible et un correspond à un événement extrême de probabilité d'occurrence très faible. Les enchaînements et les combinaisons de processus sont aussi étudiés.
- > Toute mesure est examinée pour elle-même et en regard de l'ensemble du système auquel elle appartient.

2.4.2 **Prise en compte des mesures d'organisation dans l'évaluation des dangers**

Les mesures d'organisation, qui relèvent de la préparation, ne sont pas prises en compte dans l'évaluation des dangers, contrairement aux ouvrages de protection permanents. Les systèmes de surveillance, d'alerte et d'alarme atténuent certes les risques encourus par les personnes (p. ex. en leur interdisant l'accès à une zone menacée) et par les biens. Mais ils n'ont généralement aucun effet sur les processus dangereux eux-mêmes. Autrement dit, les mesures temporaires, dont la fiabilité et la disponibilité ne sont pas assurées dans toutes les situations, n'ont aucune répercussion sur les cartes des dangers.

Sécurité structurale

La résistance d'un ouvrage aux actions résultant des scénarios considérés est vérifiée. Si sa résistance est insuffisante, l'ouvrage est peu fiable.

Aptitude au service

L'aptitude au service d'un ouvrage décrit sa faculté à fonctionner conformément aux exigences d'utilisation auxquelles il doit satisfaire (p. ex. hauteur utile d'un filet) pendant la durée de sa mise en œuvre.

Durabilité

La sécurité structurale et l'aptitude au service d'un ouvrage devraient satisfaire aux exigences posées pendant une longue période, dans les limites des actions prévisibles.

Fiabilité

Pour être très fiable, un ouvrage doit remplir les exigences en matière de sécurité structurale, d'aptitude au service et de durabilité (mesure pleinement efficace). Une fiabilité limitée entraîne une efficacité réduite. Lorsqu'un ouvrage est peu fiable (effet nul, voire négatif), il faut s'attendre à ce qu'il cède.

Évaluation de l'effet

L'effet d'un ouvrage est évalué en fonction de sa fiabilité; il quantifie son incidence sur le déroulement d'un processus.

Pour en savoir plus

- > Norme SIA 260 «Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses»
- > Norme SIA 261 «Actions sur les structures porteuses»
- > Norme SIA 269 «Bases pour la maintenance des structures porteuses»
- > Norme SIA 269/1 «Maintenance des structures porteuses – Actions»
- > Romang H. (éd.) 2008: *Efficacité des mesures de protection. Stratégie «Dangers naturels» Suisse. Projet A 3. Plate-forme nationale «Dangers naturels» PLANAT, Berne*

2.5

Exigences à satisfaire lors de l'évaluation des dangers

Les exigences à satisfaire lors de l'évaluation des dangers croissent en fonction du niveau de détail de l'étude. C'est pourquoi on distingue trois niveaux correspondant aux échelles E1 à E3:

Niveau 1: carte indicative des dangers (échelle sommaire, E1)

Niveau 2: carte des dangers (échelle moyenne, E2)

Niveau 3: étude relative à un projet de construction ou étude de détail (échelle fine, E3)

E1: Exigences concernant la carte indicative des dangers

La carte indicative des dangers donne un aperçu de l'occurrence spatiale des processus dangereux et indique ainsi où quelque chose peut se produire. Elle est censée signaler autant que possible tous les périmètres susceptibles d'être touchés par des mouvements de terrain. La carte indicative ne différencie pas les degrés de danger – définis par une intensité et une probabilité d'occurrence. Elle indique seulement s'il existe un danger potentiel (classification de type «oui/non»).

E1 = échelle 1

E2: Exigences concernant l'établissement de la carte des dangers

La carte des dangers est utilisée aux échelons communal et cantonal pour transposer la situation de danger dans l'aménagement du territoire (plan d'affectation). Elle doit donc subdiviser aussi précisément que possible le périmètre affecté en degrés de danger. Cette carte est généralement établie à l'échelle du 1:5000 ou du 1:10000. Elle sera éventuellement plus précise (p. ex. 1:2000) ponctuellement ou dans des cas particuliers. La carte des dangers, qui distingue cinq degrés de danger, offre un contenu et une résolution spatiale plus détaillés que la carte indicative des dangers.

E2 = échelle 2

La carte des dangers, la carte des intensités et le rapport technique qui les accompagnent contiennent des indications exhaustives sur les causes, le déroulement, l'extension spatiale, l'intensité et la probabilité d'occurrence des mouvements de terrain susceptibles de survenir. L'évaluation des dangers qu'ils occasionnent commence par l'établissement d'une documentation qui indique les dangers existants. Les événements passés fournissent des informations sur les processus et leur extension spatiale, sous forme d'observations, de photos ou de mesures. Les résultats obtenus sont consignés dans un cadastre des événements naturels et représentés sur un fond cartographique.

Synthèse des documents nécessaires pour établir le dossier d'une carte des dangers:

- > Cadastre des événements naturels et documentation des événements (StorMe).
- > Carte des phénomènes à l'échelle 1:10000 ou plus fine.
- > Cadastre des ouvrages de protection avec évaluation de leurs effets.
- > Cartes des intensités afférentes aux scénarios décrivant les événements de période de retour égale à 30 ans, 100 ans et 300 ans, ainsi que l'événement extrême si nécessaire.
- > Rapport technique contenant tous les calculs, modélisations et explications nécessaires.
- > Coupes transversales ou trajectoires annexées dans le cas des processus de chute et des glissements de grande ampleur.
- > Cartes des dangers à cinq degrés avec le périmètre des zones étudiées.

E3: Exigences concernant les projets de construction et les études détaillées

Les projets de construction et les processus complexes requièrent un traitement approfondi, qui dépasse les travaux habituellement accomplis pour établir une carte des dangers. Cette étude détaillée porte par exemple sur un projet d'ouvrage de protection, son dimensionnement, un risque important ou une pente spécialement dangereuse. Les

E3 = échelle 3

évaluations complexes, éventuellement contestées, qui font l'objet d'une expertise relèvent aussi du niveau E3. En règle générale, les cartes détaillées sont établies à l'échelle 1:5000 ou plus fine. Les projets de construction, en particulier ceux qui concernent des ouvrages de protection, sont usuellement représentés à l'échelle 1:2000 ou plus fine.

Les projets de construction (niveau E3) subventionnés par la Confédération requièrent tous les produits liés à la carte des dangers (niveau E2), ainsi que d'autres si le travail nécessaire à leur établissement est proportionné en regard du risque, ce qui est apprécié de cas en cas:

- > Modèle géologique incluant les caractéristiques des matériaux.
- > Modèle hydrogéologique lorsque l'eau joue un rôle déterminant.
- > Données quantitatives sur les déplacements, les vitesses et les déformations par cisaillement.
- > Forages dans le cas des glissements profonds générant un risque élevé.
- > Résultats des modélisations des processus de chute, y compris les énergies et les hauteurs de rebond à l'emplacement des ouvrages de protection (en vue de les dimensionner).
- > Modélisation des processus de glissement et d'écoulement.
- > Évaluation quantitative de l'effet des ouvrages de protection.
- > Carte des intensités et des dangers avant et après la réalisation de mesures.

2.6

Produits cartographiques liés aux dangers

Pour être à même de gérer les risques, il faut d'abord décrire et évaluer les dangers. Les principaux produits obtenus au terme de l'évaluation des dangers sont des cartes des intensités et des cartes des dangers. Elles seront exploitées pour établir le besoin d'agir, analyser les risques (chap. 3) et planifier des mesures de protection (chap. 4).

Les cartes des dangers sont des représentations spatiales des dangers dus aux mouvements de terrain et des menaces qui en résultent pour les personnes, les biens, l'environnement et d'autres valeurs. Elles sont nécessaires – conjointement avec les cartes des intensités et d'autres documents – pour expliquer les dangers aux autorités et aux intéressés. Ils en ont besoin pour déterminer le besoin d'agir et concevoir des mesures appropriées (mesures de précaution, de maîtrise des événements extraordinaires, etc.).

L'analyse des dangers doit être confiée à des spécialistes chevronnés. Les services cantonaux en charge des dangers naturels sont responsables de son contenu. Il faut collecter et examiner de nombreux documents, qui portent non seulement sur les processus avérés dans un périmètre donné, mais aussi sur les processus présumés et imaginables (voir § 2.10 «Définition des scénarios»):

- > Événements documentés.
- > Événements non détectés à l'endroit considéré, mais qui se sont produits dans des régions ou des situations comparables.

- > Événements susceptibles de se produire dans le secteur considéré compte tenu de tous les critères examinés.

Les principaux produits issus de l'évaluation des dangers sont décrits ci-après.

2.6.1 Carte indicative des dangers

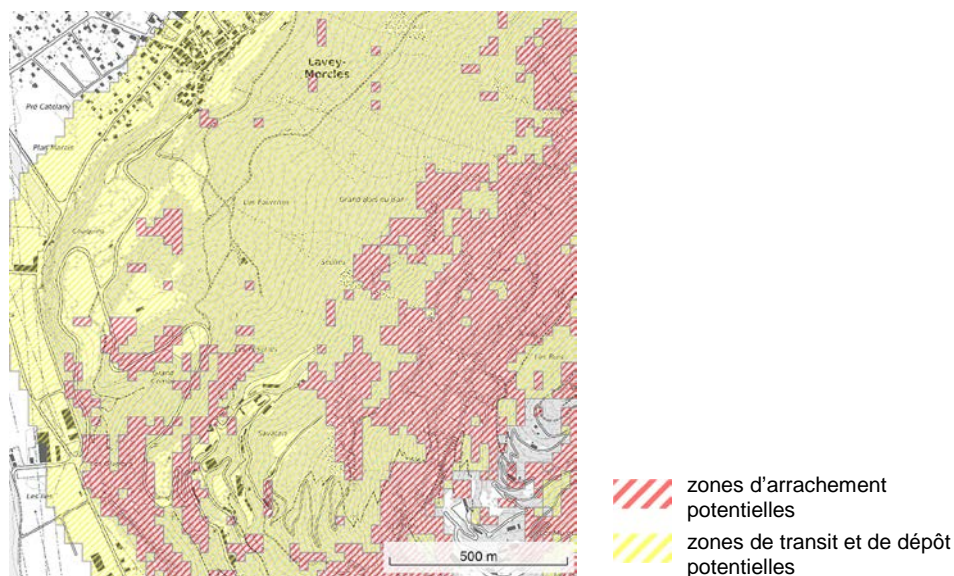
La carte indicative des dangers fournit une vue d'ensemble sommaire de la situation de danger. Elle répertorie les endroits potentiellement menacés sur l'intégralité d'une vaste surface, mais sans mentionner le degré de danger (fig. 5). Chaque type de processus fait l'objet d'une carte distincte. Basée sur des documents géoscientifiques ou sur des modélisations, la carte indicative des dangers est validée par comparaison avec le cadastre des événements. Elle peut contenir des inexactitudes de délimitation spatiale et ne pas décrire précisément la menace dans chaque cas. Elle ne comprend que des indications, non des faits vérifiés, au sujet des dangers. Elle n'est utilisée qu'en l'absence de carte des dangers contraignante (p.ex. hors des zones urbanisées) ou pour donner une vue d'ensemble spécifique.

On peut en déduire, avec un minimum de moyens, les lieux de conflits possibles entre le danger et l'affectation.

- > Usage: document de base pour établir le plan directeur cantonal, identifier les secteurs de conflits, examiner les demandes de permis de construire hors des périmètres couverts par les cartes des dangers, fixer des priorités lors de l'élaboration des cartes des dangers.
- > Précision: faible, peut contenir des inexactitudes, non vérifiée sur place.
- > Échelle: 1:10 000 à 1:50 000.
- > Périmètre: généralement un canton (ou une région ou une commune).
- > Mise à jour: périodique, dans le cadre du plan directeur.

Fig. 5 > Carte indicative des dangers de chute de pierres et de blocs

Le mode de représentation d'une carte indicative des dangers peut varier, en distinguant par exemple les événements documentés des événements supposés, ou encore en faisant figurer les mouvements de terrains modélisés.



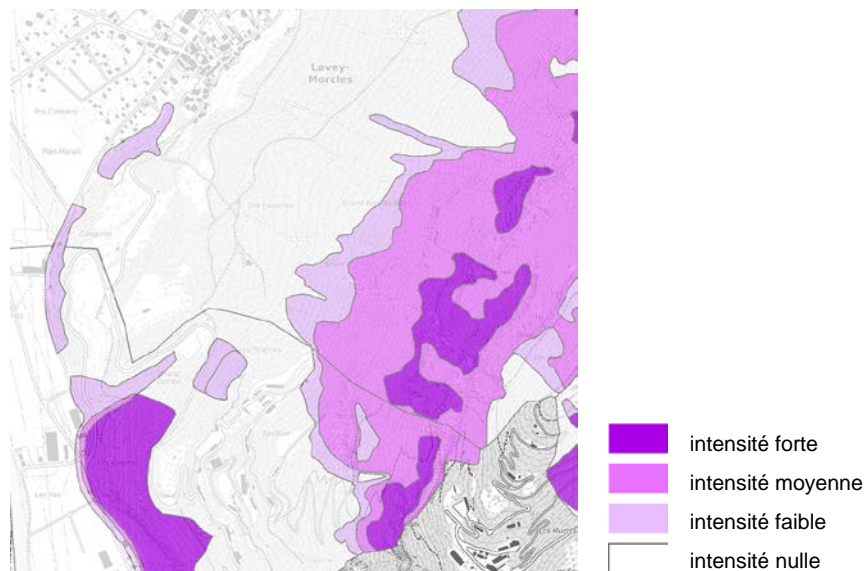
canton de Vaud, projet CDN-VD, GEODE-DN

2.6.2 Carte des intensités

La carte des intensités indique, par classe de probabilité (élevée, moyenne, faible, très faible), les intensités des processus dangereux auxquels il faut s'attendre (fig. 6). Des valeurs limites sont assignées pour échelonner l'intensité de chaque processus. Elle est estimée en appliquant des grandeurs adaptées au processus considéré (p. ex. l'énergie dans le cas des processus de chute, voir § 2.9).

Ainsi utilisée pour établir la carte des dangers, la carte des intensités a de nombreux autres usages. L'énergie et sa répartition spatiale servent par exemple à dimensionner des ouvrages de protection (capacité d'absorption énergétique, emplacement approprié, etc.).

- > Usage: document de base pour élaborer les cartes des dangers et analyser les risques (EconoMe); instrument pour planifier des mesures d'urgence, protéger des objets ou concevoir des ouvrages de protection.
- > Contenu: intensités différenciées en quatre classes (forte, moyenne, faible, nulle) dans le cadre de chaque scénario.
- > Précision: élevée (comme pour la carte des dangers).
- > Échelle: 1:2000 à 1:10 000 (comme pour la carte des dangers).
- > Périmètre: région, commune (partie du territoire; comme pour la carte des dangers).
- > Mise à jour: comme pour la carte des dangers.

Fig. 6 > Carte des intensités de chutes de pierres et de blocs*Période de retour 100 ans.*

canton de Vaud, projet CDN-VD, GEODE-DN

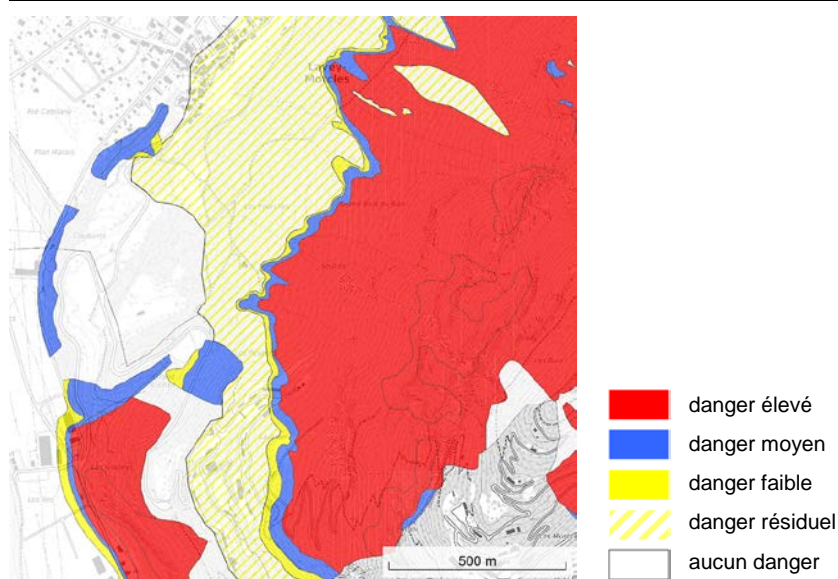
2.6.3 Carte des dangers

La carte des dangers et le rapport technique qui l'accompagne contiennent des indications détaillées sur les causes, le déroulement, l'extension spatiale, l'intensité et la probabilité d'occurrence des dangers naturels (fig. 7). La carte des dangers revêt un caractère obligatoire pour les autorités. Elle constitue la base technique de référence pour la prise en compte des dangers naturels lors de l'élaboration des plans d'affectation communaux (plans d'aménagement locaux). Elle peut aussi servir à planifier et ordonner des mesures de protection d'objets et à établir des plans d'urgence. La carte des dangers n'indique toutefois pas les risques liés aux processus qu'elle décrit.

- > Usage: document de base pour utiliser le territoire d'une manière adaptée, délimiter les zones de danger dans le plan d'affectation, formuler des exigences de construction, planifier des mesures.
- > Contenu: indication précise des types de danger, extension des zones menacées assorties du degré de danger respectif (cinq degrés, échelonnés en fonction de l'intensité et de la probabilité d'occurrence), documentation détaillée.
- > Précision: élevée, délimitation précise (précision parcellaire).
- > Échelle: 1:2000 à 1:10000.
- > Périmètre: région, commune ou partie de territoire (territoire non couvert en entier, le périmètre d'investigation étant fixé le plus largement possible, en prévision de l'avenir, dans un but de prévention).

- > Mise à jour: périodique, par exemple dans le cadre d'une révision du plan d'affectation; lorsque la situation de danger a changé notablement (p. ex. après la réalisation de mesures de protection ou en cas de modification des conditions naturelles); lorsque de nouvelles méthodes ou de nouveaux documents permettent d'améliorer notablement l'évaluation des dangers; à l'issue d'événements (divergence avec les scénarios ou les effets évalués).

Fig. 7 > Carte des dangers de chute de pierres et de blocs



canton de Vaud, projet CDN-VD, GEODE-DN

Modélisation des données et publication des cartes des dangers

Les cantons rendent les documents de base sur les dangers accessibles au public sous une forme adaptée afin que les intéressés directs et la population soient informés le mieux possible des dangers existants (art. 15, al. 4, OFo).

Modèle de géodonnées:

- > «Carte des dangers», dotée de l'identificateur 166.1 (correspond à la carte indicative des dangers, à la carte des intensités et à la carte des dangers, selon les § 2.6.1 à 2.6.3).

Pour en savoir plus

- > Cartes des dangers: www.bafu.admin.ch/dangers-naturels > Informations pour spécialistes: eau, ... > Situation de danger et ... > Données de base sur les dangers > Cartes des dangers, ...
- > Modèles de géodonnées: www.bafu.admin.ch/geodatenmodelle [FR], dont Modèle de géodonnées pour la cartographie des dangers, OFEV 2015

2.7 Évaluation des dangers au moyen du diagramme intensité-probabilité

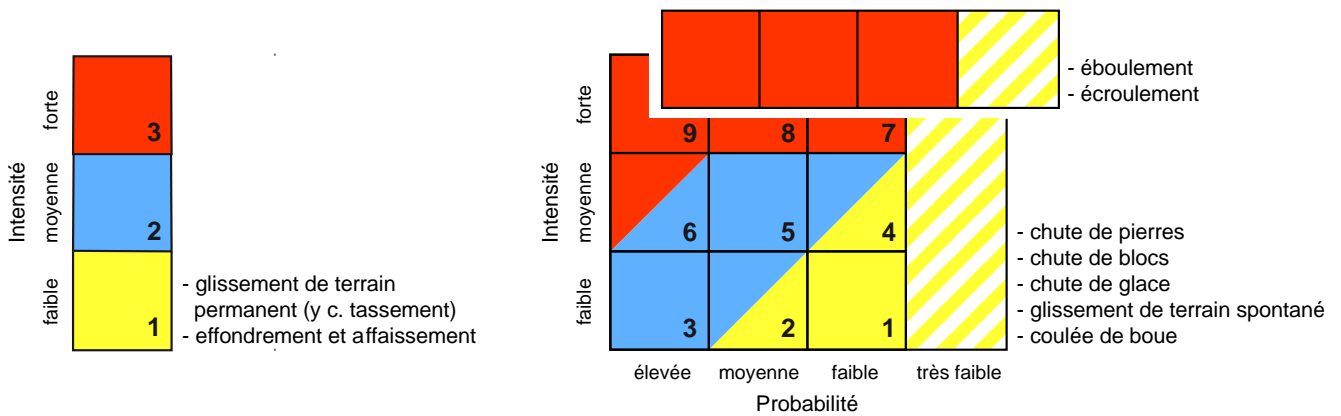
Le mode d'établissement de la carte des dangers découle essentiellement d'objectifs d'aménagement du territoire, c'est pourquoi elle ne comprend que trois degrés de danger et une zone de danger résiduel correspondant à une probabilité d'occurrence très faible. Si aucune menace n'a été identifiée dans un périmètre évalué, celui-ci reste blanc. La subdivision des degrés de danger se base sur des critères homogènes portant sur les atteintes possibles aux personnes et aux biens. Le but est que tous les processus naturels dangereux soient traités de la même manière. Cette comparabilité est impérativement nécessaire pour prendre, de manière coordonnée, des mesures d'aménagement du territoire, pour concevoir des ouvrages de protection, ou encore dans une perspective plus globale. Ces critères généraux sont évalués uniformément dans le cas des avalanches, crues et mouvements de terrain (BFF et EISLF 1984, OFEE et al. 1997, OFAT et al. 1997).

Deux paramètres sont déterminants pour graduer l'importance de la menace imputable au processus considéré: l'intensité et la probabilité (ou la période de retour). Ils sont couplés dans un diagramme intensité-probabilité (fig. 8), aussi nommé diagramme des degrés de danger. Celui qui décrit les mouvements spontanés comporte neuf cases et celui qui décrit les glissements permanents et les processus d'effondrement en a trois (probabilité indifférenciée). Les processus spontanés et permanents se distinguent comme suit:

Les processus spontanés sont des phénomènes qui surviennent brusquement, sans mouvement précurseur ni signe annonciateur de vitesse élevée. Citons par exemple les processus primaires (se produisant pour la première fois), les réactivations et les ruptures partielles, qui prennent naissance dans la zone d'arrachement ou dans la zone frontale et qui présentent une activité élevée. Ils peuvent être assortis d'une probabilité d'occurrence. Les processus permanents (continus) ne sont en revanche pas classifiés en fonction des différentes probabilités d'occurrence – elle est toujours égale à 100%. Les glissements permanents peuvent aussi être sujets à des variations de vitesse (accélération, ralentissements), qui sont prises en compte dans l'évaluation des dangers par le biais des critères définissant l'intensité (fig. 11).

Fig. 8 > Diagrammes intensité-probabilité appliqués aux mouvements de terrain permanents (à gauche) et spontanés (à droite)

Les chutes de glace sont évaluées à l'aide du diagramme de droite, comme les chutes de pierres. Les tassements sont traités à l'aide du diagramme de gauche, comme les glissements permanents, conformément à la définition donnée à l'annexe A2. La prédisposition à l'effondrement ou à l'affaissement (y compris la formation de dolines) est subdivisée en trois classes – faible, moyenne ou forte; le degré de danger – jaune, bleu ou rouge – est déterminé à l'aide du diagramme de gauche, de la même manière que les classes d'intensité appliquées aux glissements permanents. Explications complémentaires dans le texte et aux chapitres suivants



Les degrés de danger indiquent le niveau de la menace qui pèse sur les personnes, les animaux, les bâtiments, les infrastructures et les biens d'une valeur notable, en tenant compte du fait que les personnes sont généralement plus en sécurité dans les bâtiments qu'en plein air.

Tab. 1 > Signification des degrés de danger

Il y a lieu de se référer à l'annexe 4 (tab. 6) et à la publication intitulée «Aménagement du territoire et dangers naturels» (ARE et al. 2005) en ce qui concerne leur transposition dans l'aménagement du territoire.

Degré de danger	Signification
Rouge: danger élevé	<ul style="list-style-type: none"> 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 <ul style="list-style-type: none"> Les événements se manifestent avec une intensité plutôt faible, mais une probabilité d'occurrence élevée. Dans ce cas, les personnes sont surtout menacées à l'extérieur des bâtiments. Les bâtiments subissent d'importants dégâts ou ils deviennent inhabitables.
Bleu: danger moyen	<ul style="list-style-type: none"> Les personnes sont en danger à l'extérieur des bâtiments, mais peu ou pas à l'intérieur. Il faut s'attendre à des dégâts aux bâtiments, mais pas à leur destruction rapide, pour autant que leur mode de construction soit adapté aux conditions en présence.
Jaune: danger faible	<ul style="list-style-type: none"> Le danger pour les personnes est faible ou inexistant. Il faut s'attendre à de faibles dégâts aux bâtiments, dont l'utilisation peut être entravée.
Hachuré jaune/blanc: danger résiduel	<ul style="list-style-type: none"> Les dangers de probabilité d'occurrence très faible peuvent être signalés par un hachuré jaune-blanc. La zone hachurée en jaune-blanc est une zone de sensibilisation qui met en évidence un danger ou un risque résiduel. La délimitation des zones de sensibilisation doit être restrictive. Elle tiendra compte du type de phénomène et du potentiel de dommages.
Blanc	<ul style="list-style-type: none"> Aucun danger ou danger négligeable en l'état des connaissances actuelles.

Le degré de danger est défini séparément pour chaque source de danger et chaque processus. Il est assorti d'un indice dans la carte des dangers. Les abréviations suivantes s'appliquent aux mouvements de terrain:

- > Chute de pierres et de blocs: CPB
- > Éboulement: CEB
- > Écroulement: CEC
- > Glissement superficiel: GSU
- > Glissement semi-profond: GSP
- > Glissement profond: GPR
- > Coulée de boue: CB
- > Effondrement et affaissement (y c. dolines): D

Le type de mouvement des glissements de terrain peut être complété par un indice supplémentaire: permanent (P) ou spontané (S).

Le numéro de la case du diagramme intensité-probabilité (chiffre 1–9, ou 1–3 dans le cas des glissements permanents et des processus d'effondrement, voir fig. 8) est ajouté à l'abréviation du processus. L'indice CPB8 décrit par exemple des chutes de pierres et de blocs d'intensité forte et de probabilité d'occurrence moyenne (case 8).

Si un périmètre est menacé par plusieurs dangers, c'est celui dont le degré est le plus élevé qui est déterminant pour établir la carte des dangers. Les degrés de danger ne s'additionnent pas pour atteindre un degré supérieur. Exemple: un danger moyen (bleu) dû à une coulée de boue et un autre danger moyen (bleu) dû à un glissement de terrain donnent toujours un danger moyen (bleu) et non un danger élevé (rouge). Cela est dû au fait que le danger imputable à un processus n'est généralement pas accru par la superposition et qu'il est possible de prendre des mesures de protection contre chaque processus. Par contre, la probabilité d'occurrence d'un dommage augmentera éventuellement en cas de chevauchement, ce qui aura pour effet d'accroître le risque. Il faut en outre examiner l'influence des interactions entre les processus sur l'intensité des événements.

2.8 Critères d'évaluation de la probabilité

La méthode décrite dans la présente aide à l'exécution assigne une probabilité d'occurrence à chaque processus. La notion de période de retour est maintenant bien établie dans le domaine de la protection contre les crues et les avalanches. Ici, une probabilité d'occurrence annuelle est conférée aux mouvements de terrain. Les deux expressions sont mathématiquement réciproques:

$$P_y = 1/T$$

P_y = probabilité d'occurrence annuelle

T = période de retour

La probabilité d'occurrence annuelle est une valeur statistique qui décrit la survenance d'un événement. Quand P_y vaut 0,033, la probabilité que l'événement en question se produise au cours d'une année est de 3,3 % ou cet événement se produit en moyenne une fois tous les trente ans. Dans le cas des mouvements de terrain, une probabilité d'occurrence annuelle (0,033; 0,01; 0,003; <0,003) est généralement appliquée par analogie avec la période de retour des crues et des avalanches (30 ans, 100 ans, 300 ans, >300 ans). Au vu des scénarios climatiques, il faut s'attendre à un changement de régime des précipitations (quantité et intensité) et à une augmentation de la température. Ces modifications ainsi que la fonte de la glace dans les zones glaciaires et périglaciaires (p. ex. pergélisol) seront prises en compte dans la mesure du possible.

La probabilité d'occurrence annuelle permet de calculer la probabilité d'occurrence pendant une période donnée (p. ex. la durée de vie d'un bâtiment):

$$P_n = 1 - (1 - P_y)^n$$

avec: n = période considérée
 P_y = probabilité d'occurrence annuelle
 P = probabilité d'occurrence

L'évaluation de la probabilité d'occurrence des mouvements de terrain peut être améliorée par une surveillance ou un monitoring, selon les circonstances (voir chap. 4). En particulier, les vastes compartiments rocheux glissant à grande profondeur sont susceptibles de fournir, en raison de leur dynamique, des informations importantes au sujet de leur probabilité de mobilisation et de leur évolution.

Tab. 2 > Relation entre probabilité d'occurrence et période de retour

Probabilité d'occurrence	
Probabilité d'occurrence en 50 ans	Probabilité d'occurrence descriptive
100 à 82 %	élevée
82 à 40 %	moyenne
40 à 15 %	faible
<15 %	très faible
Période de retour	
Période de retour en années	Période de retour descriptive
<30	fréquent
30 à 100	assez fréquent
100 à 300	rare
>300	très rare

2.8.1 La probabilité d'occurrence des processus de chute

L'analyse des événements historiques ne permet de déterminer la probabilité d'occurrence annuelle des mouvements de terrain qu'à certaines conditions. Dans le cas des chutes de petit volume, par exemple de pierres ou de blocs, l'analyse de la production d'éboulis dans la zone de dépôt est un bon moyen d'établir empiriquement la probabilité d'une rupture. Dans le cas des événements de grand volume, comme les éboulements et les écroulements, la probabilité d'occurrence doit en revanche être estimée en fonction des caractéristiques de la zone d'arrachement potentielle. Les géologues l'évaluent en identifiant des processus similaires en cours et en déterminant les mécanismes de rupture possibles. Ici également, il est essentiel d'étudier les contextes en mutation (retrait glaciaire, drainage, augmentation de la température, etc.).

La cartographie des dangers englobe plusieurs méthodes aidant à déterminer la probabilité d'occurrence des processus de chute:

- > L'analyse géologique de la roche dans la zone de provenance ou d'arrachement, aussi nommée zone de production; elle permet d'évaluer la probabilité de rupture ou d'accélération d'un compartiment rocheux; cette approche comprend une analyse structurale et un levé des discontinuités et des zones de rupture.
- > L'observation des «témoins muets» présents dans le cône d'éboulis ou dans la zone de dépôt; les pierres et les blocs éboulés sont assignés à une classe de probabilité à l'aide du cadastre des événements naturels.

Toutes les observations et informations acquises sont intégrées dans la définition des scénarios.

2.8.2 La probabilité d'occurrence des processus de glissement

La probabilité d'occurrence des glissements permanents est égale à 1 (ou 100%), ce qui signifie que l'événement s'est déjà produit et est en cours. C'est pourquoi il est recommandé de commencer par déterminer la vitesse moyenne pluriannuelle (v) pour évaluer le danger. Puis on considère la vitesse accrue (v_{\max}). La vitesse varie en fonction de plusieurs facteurs, parmi lesquels les précipitations, le niveau d'eau à l'intérieur du massif, le mécanisme de glissement, la profondeur et le volume de l'instabilité jouent un rôle important. L'ampleur de l'analyse augmente et les possibilités d'appréhender l'ensemble de la situation diminuent lorsque le volume mobilisé, la profondeur du glissement et les circulations d'eaux souterraines croissent.

La plupart des glissements actifs sont épisodiquement sujets à des vitesses accrues ou à des accélérations (v_{\max}) rares ($P_y = 0,01$) à très rares ($P_y = 0,003$). Il faut donc tenir compte des développements et des scénarios défavorables, tels que rupture spontanée, processus primaire («first move»), processus secondaire («second move»), crue concomitante au glissement, etc. L'accélération d'un glissement est susceptible d'accroître son étendue et de mobiliser des compartiments substables ou inactifs jusqu'alors. Les accélérations et les réactivations surviennent principalement lorsque la pression d'eau dans les pores ou dans les discontinuités croît fortement. Une carte détaillée des phénomènes permet de localiser ce danger dans un bon nombre de cas (Raetzo et Rickli

2007). La probabilité de présence d'une instabilité dans un terrain meuble en équilibre précaire et qui n'a encore jamais bougé (glissement potentiel) peut être évaluée à l'aide de calculs et de modèles. En terrain rocheux, cette approche implique des hypothèses géomécaniques.

Un cas particulier de glissement actif se présente lorsqu'une surface de glissement secondaire génère une rupture «spontanée» au front d'un glissement de terrain en provoquant une forte accélération d'un compartiment de la masse mobilisée. Les processus rapides comme celui-ci sont traités au point suivant. L'étude des scénarios d'accélération doit inclure l'extension du glissement de terrain, la formation de surfaces de glissement secondaires et l'amplification des mouvements différentiels.

Les glissements spontanés peuvent:

- > revêtir la forme de glissements translationnels ou rotationnels, superficiels à semi-profonds, qui se produisent rapidement et spontanément sans signe précurseur ni mouvement préalable; lors des intempéries de ces dernières années, des processus spontanés de ce type se sont fréquemment manifestés après un pic de précipitations; le volume de la masse mobilisée peut atteindre 100 000 mètres cubes; la méthode décrite à la fig. 9 s'applique pour déterminer la probabilité d'occurrence d'un glissement superficiel («first move») qui se transformera en coulée de boue («second move»);
- > concerner une partie d'un glissement profond qui, par exemple, glisse spontanément ou se détache au front très raide du glissement principal sous l'effet d'une vitesse élevée ou de l'érosion fluviale; la probabilité d'occurrence d'une telle rupture dépend des caractéristiques géotechniques et de la vitesse du glissement principal, des conditions hydrogéologiques et de la vitesse de l'érosion active dans un éventuel cours d'eau voisin; en général, une (nouvelle) surface de glissement secondaire est activée lorsqu'une masse glisse spontanément; son volume peut atteindre plusieurs millions de mètres cubes dans certains cas rares: son énergie et ses effets sur les bâtiments sont comparables à ceux des éboulements.

La probabilité d'occurrence indique si un changement de situation est susceptible d'activer un glissement de terrain. La probabilité d'activation dépend étroitement des conditions météorologiques. C'est ainsi, par exemple, que des précipitations persistantes, éventuellement combinées avec la fonte des neiges, sont de nature à réactiver un glissement inactif.

Un cas particulier de glissement inactif se présente lorsqu'un glissement est susceptible d'apparaître là où il n'y a jamais eu de mouvement auparavant. En cas d'intempérie, des glissements surviennent parfois inopinément ou «spontanément» dans des pentes inactives jusqu'alors («first move»). Le risque de glissement superficiel peut être évalué sur place en cartographiant les phénomènes, en mesurant la déclivité de la pente, en analysant les terrains meubles et en étudiant les écoulements à l'intérieur de la pente (voir § 2.3.4).

2.8.3 La probabilité d'occurrence des processus d'écoulement

Les coulées de boue peuvent se produire sous la forme de processus initiaux («first move») ou secondaires («second move»). C'est pourquoi la prédisposition de la zone d'arrachement et la probabilité d'occurrence des coulées de boue présentent certaines similitudes avec celles des glissements spontanés superficiels à semi-profonds (voir § 2.8.2). La masse mobilisable a généralement une épaisseur de 0,5 à 3 m et atteint plus rarement la dizaine de mètres.

La prédisposition aux coulées de boue et les secteurs sujets à ce processus sont établis en réalisant des investigations in situ et des modélisations. L'analyse porte sur un périmètre géologiquement homogène, c'est-à-dire sur des terrains meubles géologiquement identiques ou similaires. Il faut surtout tenir compte de leurs propriétés géotechniques. La méthode décrite ci-après et illustrée à la fig. 9 est basée sur les travaux du groupe de travail «Danger naturel et géologie» (AGN 2004, sur mandat de l'OFEG); elle fournit des éléments pour évaluer la probabilité de rupture dans une zone d'arrachement potentielle. Dans le cadre de l'évaluation des dangers, le relevé des coulées de boues qui se sont produites antérieurement dans le périmètre examiné revêt une importance primordiale. À défaut de données inscrites au cadastre des événements, on peut appliquer par approximation des informations tirées de régions voisines ou d'autres sources portant sur des unités géologiques comparables.

Les processus d'écoulement peuvent être traités par étapes:

Détermination du périmètre d'investigation

Étape 1

Le périmètre d'investigation est fixé en fonction de critères géologiques, le but étant de déterminer une prédisposition similaire. Des zones géologiquement uniformes et homogènes sont généralement distinguées à cet effet. On distingue en principe les terrains meubles de la roche en place, car ce sont le plus souvent des terrains surmontant la roche qui sont mobilisés. Il faut aussi tenir compte des caractéristiques géotechniques de la roche (p. ex. granulométrie, angle de frottement interne, cohésion, plasticité).

Établissement du cadastre des événements naturels et cartographie des phénomènes

Étape 2

Le cadastre des événements naturels donne des renseignements au sujet des coulées de boue et des glissements superficiels recensés. Les événements qui se sont produits antérieurement dans le périmètre d'investigation sont levés et évalués («témoins muets» visibles sur le terrain, indices d'instabilité, enquête auprès de la population locale).

Les analyses des intempéries ont révélé que plus de 70 % des lieux affectés présentaient des traces d'événements passés. Des observations rigoureuses effectuées sur le terrain sont ainsi indispensables lorsqu'on évalue le danger de coulée de boue.

Détermination de la déclivité des zones d'arrachement

Étape 3

Les résultats de l'étape 2 sont interprétés statistiquement en analysant la fréquence des coulées de boue en fonction de la déclivité de leurs zones d'arrachement géologiquement homogènes (fig. 10). On en déduit la pente moyenne α_m de toutes les zones sujettes à un départ de coulée de boue, assortie d'un écart type (σ). Si la détermination statistique de la déclivité moyenne est fondée sur un nombre insuffisant de mesures, il est possible d'appliquer des valeurs approximatives concernant des unités géologiques comparables situées dans des régions voisines.

En général, il y a prédisposition aux coulées de boue lorsque qu'un périmètre d'investigation comprenant des pentes supérieures à 20° présente des caractéristiques géologiques défavorables (étape 4). Dans certaines situations géologiques particulières, la déclivité peut aussi être inférieure à 20° (cas exceptionnel).

Détermination des facteurs aggravants

Étape 4

Différents facteurs favorisent le déclenchement de coulées de boue. Leur influence doit être examinée de cas en cas. On la différencie en la qualifiant de forte, faible ou nulle. L'appréciation et la pondération des facteurs considérés seront expliqués dans le rapport associé à la carte des dangers. La présence de mouvements de terrain actifs ou anciens et l'influence potentielle de l'eau (degré de saturation, pression, force de percolation) revêtent une grande importance.

Facteurs susceptibles de favoriser le déclenchement d'une coulée de boue:

- > Situation dans un secteur en glissement permanent: modification de la déclivité et du régime de circulation de l'eau due à un mouvement continu.
- > Formes du terrain: par exemple, passage d'une pente faible à une pente forte (variation de la déclivité) ou situation dans une cuvette.
- > Contraste de perméabilité à proximité de la surface: horizon imperméable sous-jacent (p. ex. toit du rocher) ou couche peu perméable intercalée.
- > Conditions hydrogéologiques: émergences d'eau circulant dans la pente ou dans le versant, présence de sources ou de zones humides, apports d'eau de la roche dans le terrain meuble (p. ex. venues d'eau karstique, circulation fissurale).
- > Conditions hydrologiques: présence de zones humides, apports d'eau dans le terrain meuble, présence en amont d'un secteur produisant de l'eau de ruissellement et/ou de pente.
- > Caractéristiques de la surface et exploitation du sol: distinction entre terrain ouvert et forêt, surface nue sujette à l'érosion, pâturage piétiné, gradins dus au bétail, dommages à la forêt (tempête, bostryche), peuplement défavorable (p. ex. vieille futaie), etc.
- > Influences anthropiques: apports d'eau à partir d'une surface imperméable (p. ex. route, quartier d'habitation, sol compacté, etc.), trop-plein de fontaine ou de chambre de captage, drainage défectueux, entailles trop raides dans le terrain, etc.

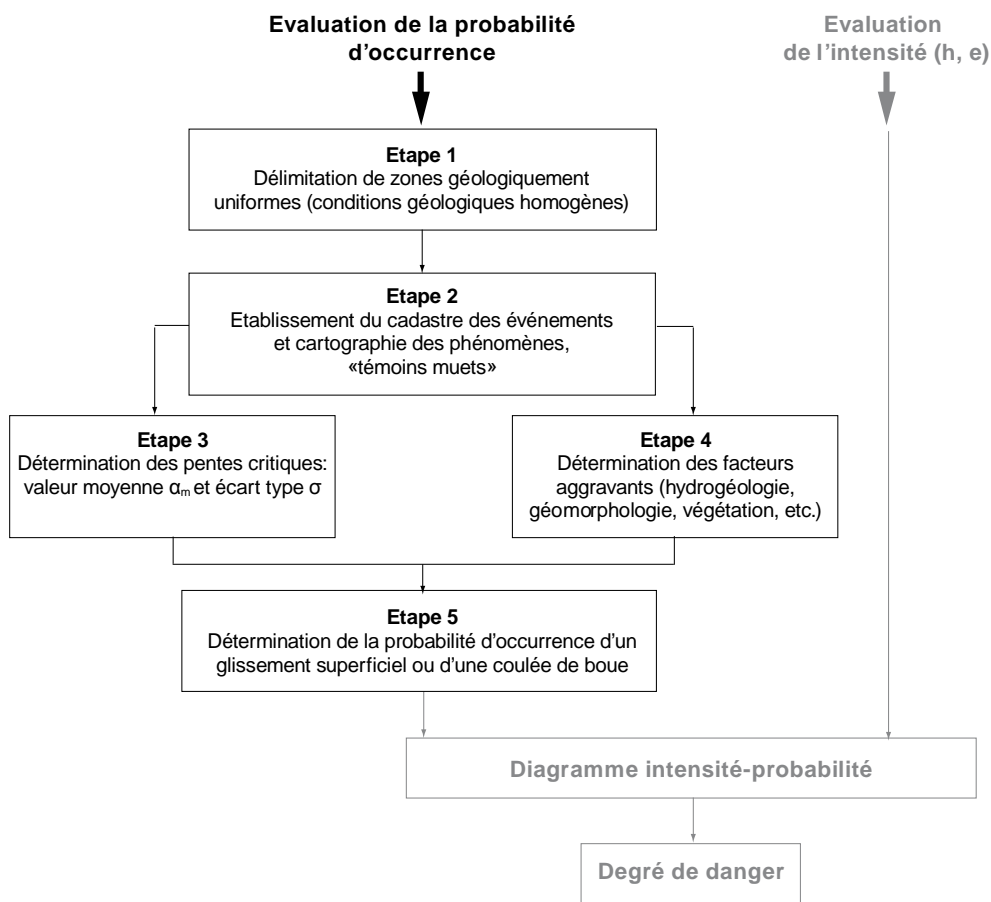
Détermination de la probabilité de départ dans la zone d'arrachement

Étape 5

La probabilité de déclenchement d'une coulée de boue est déterminée en tenant compte de la déclivité de la pente et de l'influence des facteurs aggravants. Différentes méthodes peuvent être appliquées à cet effet (voir l'annexe A3).

Fig. 9 > Étapes de la procédure suivie pour établir la probabilité d'occurrence des coulées de boue

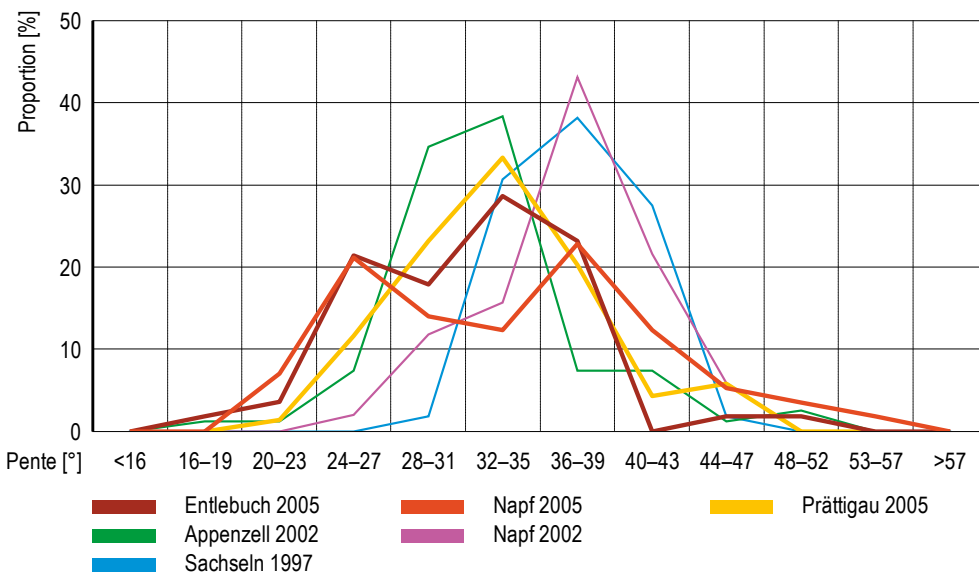
Pour déterminer le degré de danger, il faut également évaluer leur intensité (voir § 2.9).



D'autres approches sont nécessaires pour déterminer la distance d'arrêt possible. La comparaison avec des événements bien documentés se prête bien à cet effet. La propagation possible d'une coulée de boue et la probabilité qu'elle touche un objet donné peuvent aussi être déterminées, en complément, à l'aide de modélisations.

Fig. 10 > Proportion de glissements superficiels par classe de pente dans la zone d'arrachement

Les données proviennent des régions d'Appenzell, du Napf, de Sachseln, de l'Entlebuch et du Prättigau (Raetzo et Rickli 2007). Les pentes ont été relevées chaque fois après des intempéries. La pente moyenne de tous les glissements est proche de 32°, alors que la distribution affiche des valeurs de 16° à 57°. Il faut par exemple s'attendre à ce que les terrains molassiques présentent un danger lorsque la déclivité critique est supérieure à 22° et que des facteurs aggravants ont un effet déterminant. Dans certaines régions, quelques glissements se sont produits dans des pentes inférieures à 20°.



2.9 Critères d'évaluation de l'intensité

Des valeurs seuils permettant de définir les limites des classes d'intensité forte, moyenne ou faible sont fixées en fonction des caractéristiques physiques propres aux différents processus. Les critères quantitatifs appliqués à cet effet se réfèrent en général à la zone où se développe le processus, c'est-à-dire à la zone menacée, là où un potentiel de dommages est présent. Une paroi en béton fortement armé peut par exemple absorber une énergie de 300 kJ. Mais de telles données quantitatives ne sont pas toujours disponibles ou leur résolution spatiale et temporelle n'est pas adéquate. Dans ce cas, il incombe aux autorités et aux spécialistes de formuler des hypothèses appropriées et de procéder à des simplifications.

Fig. 11 > Critères de détermination de l'intensité

Abréviations, explications et précisions dans les encadrés ci-après:

E = Énergie cinétique [kJ]

v = Vitesse moyenne (pluriannuelle) du glissement [cm/an]

v_{max} = Vitesse maximale du glissement [cm/an]

md = Mouvements différentiels pendant la durée d'utilisation d'un bâtiment [cm/10 m]

p = Profondeur de la surface de glissement, épaisseur du glissement [m]

e = Épaisseur de la masse mobilisable [m]

h = Hauteur du dépôt de la coulée de boue ou du glissement de terrain [m]

Processus	Intensité faible	Intensité moyenne	Intensité forte
1. Processus de chute - Chute de pierres/blocs - Eboulement - Eroulement	$E < 30$ kJ -- --	$30 \text{ kJ} < E < 300$ kJ -- --	$E > 300$ kJ $E > 300$ kJ $E > 300$ kJ
2. Processus de glissement 2.1 Glissement actif, continu, permanent (y compris les processus dans le pergélisol)	$v \leq 2$ cm/an	$2 \text{ cm/an} < v < 10$ cm/an	$v > 10$ cm/an
2.2 Glissement spontané	$e < 0.5$ m	$0.5 \text{ m} < e < 2$ m $h < 1$ m	$e > 2$ m $h > 1$ m
3. Processus d'écoulement Coulée de boue	$e < 0.5$ m; Epandage (h), d'épaisseur décimétrique	$0.5 \text{ m} < e < 2$ m $h < 1$ m	$e > 2$ m $h > 1$ m
4. Processus d'effondrement et d'affaissement (p. ex. dolines)	Présence possible de dolines ou roche soluble	Présence avérée de dolines	Présence de dolines et danger d'effondrement avérés

E = Énergie cinétique [kJ]

- > Une énergie de 30 kJ peut encore être absorbée par une traverse de chemin de fer en chêne.
- > Une énergie de 300 kJ peut encore être absorbée par une paroi en béton fortement armé.
- > Une énergie supérieure à 300 kJ ne peut pas être absorbée par un mur standard en béton armé.

 v_{\max} = Vitesse maximale du glissement [cm/an]

L'accélération du glissement accroît la menace et par conséquent le degré de danger. v_{\max} est définie comme étant la vitesse maximale pendant une phase d'accélération ou après une réactivation. Définition: $v_{\max30}$ est atteinte lors de l'événement de période de retour égale à 30 ans, $v_{\max100}$ lors de l'événement de période de retour égale à 100 ans et $v_{\max300}$ lors de l'événement de période de retour égale à 300 ans.

- > Variation de la vitesse du glissement (v_{\max}) induisant l'augmentation d'un degré d'intensité (flèche courte): $v_{\max30} > \text{env. } 20 \text{ cm/an}$ ou $v_{\max100} > \text{env. } 40 \text{ cm/an}$ ou $v_{\max300} > \text{env. } 50 \text{ cm/an}$.
- > Variation de la vitesse du glissement (v_{\max}) induisant l'augmentation de deux degrés d'intensité, à savoir de l'intensité faible à l'intensité forte (flèche longue, «grande v_{\max} »): $v_{\max30} > \text{env. } 50 \text{ cm/an}$ ou $v_{\max100} > \text{env. } 70 \text{ cm/an}$ ou $v_{\max300} > \text{env. } 80 \text{ cm/an}$.

Lorsque l'accélération est mesurée par exemple au cours d'un trimestre, il faut calculer la vitesse annuelle correspondante: le déplacement mesuré pendant ce trimestre multiplié par quatre donne la vitesse annuelle équivalente. Cette méthode est appliquée par analogie pour d'autres durées.

La cartographie des dangers effectuée de façon systématique (p. ex. E2) ne bénéficie souvent pas de mesures exactes de v et v_{\max} . De plus, les mesures géodésiques et les informations qui en découlent ne sont pas forcément disponibles lorsqu'on procède à une étude détaillée (niveau E3) ou qu'on examine un glissement connu. Les autorités cantonales et fédérales ainsi que les géomètres peuvent éventuellement fournir des données géodésiques et des vitesses de mouvement (p. ex. données INSAR de l'OFEV). Au vu des développements possibles et de l'incidence du changement climatique, il est également envisageable de déterminer les accélérations potentielles sous la forme de scénarios, sans recourir à des valeurs mesurées. Les réactivations et les accélérations potentielles peuvent notamment être influencées par des précipitations, par la fonte de la neige, par des venues d'eaux souterraines et par des processus d'érosion (p. ex. érosion du pied d'un glissement par un torrent). Ces scénarios seront expliqués et motivés le cas échéant.

md = Mouvements différentiels

Les mouvements différentiels sont décrits par le déplacement différentiel absolu exprimé en centimètres, rapporté à une largeur unitaire de 10 mètres [cm/10 m]. Leur valeur se réfère à la durée d'utilisation du bâtiment concerné et elle est liée à sa sécurité structurale et à son aptitude au service (p. ex. pendant une cinquantaine d'années).

- > *Mouvement différentiel induisant l'augmentation d'un degré d'intensité (flèche courte):
md = 2 à 10 cm/10 m.*
- > *Mouvement différentiel induisant l'augmentation de deux degrés d'intensité (flèche longue, «grands md»): md > 10 cm/10 m.*

p = Profondeur de la surface de glissement (épaisseur du glissement)

La surface de glissement déterminante la plus élevée doit se trouver au moins à 30 m de profondeur pour justifier une diminution de l'intensité. Le degré d'intensité ne peut être abaissé d'un niveau que lorsque les conditions suivantes sont remplies simultanément:

1. *grande masse d'un seul tenant glissant à très grande profondeur;*
2. *secteurs phénoménologiquement homogènes sans surface de glissement secondaire plus proche du sol;*
3. *dynamique du mouvement attestée constante par des mesures géodésiques.*

L'intensité peut être abaissée en vertu de la profondeur de la surface de glissement si la vitesse atteint au maximum 20 cm/an et si les conditions 1 à 3 sont remplies.

Processus d'effondrement et d'affaissement

- > *Lorsque des dolines sont réparties de manière diffuse, la formation sujette à la dissolution peut être reportée largement sur la carte des dangers. Danger potentiel de dolines → danger faible (jaune).*
- > *Une classe d'intensité moyenne est conférée aux processus d'effondrement et d'affaissement (p. ex. dans des dolines) lorsque des indices d'extension spatiale sont clairement visibles sur le terrain. Les phénomènes de dissolution dans le karst génèrent des affaissements qui peuvent être rapides à très lents. Dans ce cas, le périmètre est assigné à la classe de danger moyen (bleu).*
- > *Lorsqu'un danger avéré d'effondrement est démontré, l'intensité est forte et on peut délimiter un périmètre de danger élevé (rouge). Les formations gypseuses sont par exemple très sensibles au lessivage, c'est pourquoi elles peuvent être attribuées à la zone de danger élevé si un danger d'effondrement est avéré.*

Le danger d'affaissement diminue lorsque l'épaisseur de la couverture quaternaire augmente, si celle-ci présente une autre lithologie de bonne capacité portante (p. ex. terrain morainique de grande épaisseur).

L'évaluation des dangers doit inclure le périmètre de dolines avéré et on peut y ajouter une zone de danger supplémentaire pour se prémunir contre les instabilités secondaires en marge de la zone de dolines. En général, les zones de dolines sont regroupées dans un périmètre délimité assez largement.

2.9.1 Intensités et types de dommages pouvant être liés aux processus de chute

L'impact de pierres et de blocs occasionne de graves dommages. De grosses fissures dans les éléments porteurs des bâtiments et des trous dans les parois en maçonnerie ou dans la toiture peuvent causer leur effondrement partiel ou total. Les personnes et les animaux sont fortement menacés, même à l'intérieur des bâtiments, et en danger de mort en cas d'effondrement. Les réparations sont très coûteuses. Les dommages structurels sont souvent si graves que l'évacuation et la démolition des bâtiments sont inévitables. L'accumulation de matériaux éboulés est susceptible d'entraver l'écoulement d'un cours d'eau. Les conditions de stabilité sont altérées si un lac se forme derrière cette nouvelle digue. L'instabilité ou l'érosion d'une digue submergée peut être à l'origine d'une importante crue ou lave torrentielle en aval. Les infrastructures superficielles (p. ex routes ou lignes électriques) risquent d'être endommagées directement et coupées par des processus de chute.

Intensité forte

L'impact de pierres occasionne d'importants dommages aux parois, selon leurs caractéristiques, mais sans compromettre la stabilité des bâtiments (pour autant qu'ils aient été conçus en conséquence). Les portes sont fortement endommagées ou détruites. Les personnes et les animaux ne sont pas en grand danger à l'intérieur des bâtiments. Les dommages affectent la qualité de l'habitat. Les réparations sont généralement réalisables à un coût raisonnable. L'accumulation de matériaux éboulés risque d'entraver l'écoulement d'un petit ruisseau. Les routes et les conduites superficielles peuvent être endommagées et coupées momentanément.

Intensité moyenne

Les pierres et les blocs peuvent perforer des parois en maçonnerie. Les personnes et les animaux ne sont généralement pas en danger à l'intérieur des bâtiments, mais ils le sont à l'extérieur. Un impact à la tête peut être fatal.

Intensité faible

2.9.2 Intensités et types de dommages pouvant être liés aux processus de glissement

D'importantes modifications du terrain génèrent des mouvements différentiels considérables dans le sous-sol et compromettent sérieusement la stabilité des bâtiments. Les fissures qui se forment dans les éléments porteurs statiques des bâtiments ainsi que les phénomènes d'affaissement et de basculement qu'ils subissent peuvent causer leur effondrement partiel ou total. Les portes et les fenêtres sont inutilisables. Les personnes et les animaux sont en danger à l'intérieur des bâtiments et même en danger de mort en cas d'effondrement. Les réparations sont très coûteuses. Les dommages structurels sont souvent si graves que l'évacuation et la démolition des bâtiments sont inévitables. Les

Intensité forte

infrastructures sont gravement touchées (p.ex. routes coupées). Des conduites sont cassées. L'écoulement de cours d'eau peut être entravé.

Les mouvements de terrain génèrent des fissures dans les murs, mais pas dans les éléments structurels qui garantissent la stabilité des bâtiments. L'étanchéité des joints et les liaisons entre les différentes parties des bâtiments sont dégradées. Les portes et les fenêtres coïncent. Les bâtiments risquent de s'incliner sous l'effet des modifications du terrain. Les personnes et les animaux ne sont pas directement en danger à l'intérieur des bâtiments, mais les dommages dégradent la qualité de l'habitat. Les infrastructures sont touchées (p.ex. routes et conduites superficielles ou souterraines déformées). Les drainages peuvent se boucher ou se casser.

Intensité moyenne

Les petits mouvements de terrain occasionnent des dommages légers. Ils ne compromettent pas la stabilité des bâtiments. Les grands ouvrages rigides ne sont généralement pas touchés. Les bâtiments risquent de s'incliner sous l'effet des modifications du terrain. Les personnes et les animaux ne sont pas menacés.

Intensité faible

2.9.3 Intensités et types de dommages pouvant être liés aux processus d'écoulement

L'intensité des processus d'écoulement est décrite par l'épaisseur de la masse mobilisable (e) et par la hauteur du dépôt (h), conformément à la pratique bien établie. Il est envisageable que d'autres paramètres comme la pression dynamique puissent un jour être utilisés comme critère d'intensité, par analogie avec les avalanches.

Les classes d'intensité sont décrites comme suit:

L'impact de grandes masses de pierres, boue et bois mêlés d'eau sur les éléments porteurs des bâtiments peut occasionner de graves dommages structurels ou une destruction soudaine. Les personnes et les animaux sont fortement menacés par les risques d'effondrement et de submersion. Les coulées de boue peuvent pénétrer dans les bâtiments – par les portes, les fenêtres, les baies vitrées et les autres points faibles de la structure – et mettre en danger les personnes qui s'y trouvent. Les réparations sont souvent très coûteuses. D'importantes modifications du terrain couplées avec l'apparition de grandes surfaces d'érosion, des dépôts de pierres et des inondations coupent, endommagent ou détruisent des infrastructures (p.ex. routes et conduites).

Intensité forte

Les coulées de boue sont dangereuses, malgré leur faible épaisseur, à cause des matériaux grossiers qu'elles charrient. L'impact de pierres et de blocs et la pénétration d'eau peuvent endommager l'enveloppe et l'intérieur des bâtiments, sans toutefois compromettre leur stabilité. Les coulées de boue peuvent pénétrer dans les bâtiments – par les portes, les fenêtres, les baies vitrées et les autres points faibles de la structure – et mettre en danger les personnes qui s'y trouvent. Les personnes et les animaux sont aussi en danger à l'extérieur des bâtiments. La qualité de l'habitat peut être sérieusement dégradée. Les réparations sont généralement réalisables à un coût raisonnable. Les dépôts de pierres, de boue et de bois peuvent endommager et interrompre, en particulier, des installations superficielles (p.ex. routes). Les tuyaux, les conduites et les drainages risquent d'être bouchés.

Intensité moyenne

Elle ne s'applique pratiquement que dans la zone de dépôt des coulées de boue, à des masses de matériaux peu épaisses dont le mouvement a été freiné ou en cas de pénétration d'eau. L'enveloppe et l'intérieur des bâtiments subissent des dommages de faible ampleur. La stabilité des bâtiments n'est pas du tout compromise.

Intensité faible

2.10 Définition de scénarios

Un scénario désigne un événement ou une séquence d'événements futurs possibles. La manière dont les mouvements de terrain se produisent effectivement dans un périmètre donné réserve régulièrement des surprises. Un événement peut comprendre une grande diversité de phases qui s'amplifient brusquement, évoluent de manière inattendue ou se déroulent autrement que prévu.

Pour tenir compte de la diversité et de la complexité du déroulement des processus, on évalue les dangers en appliquant des scénarios assortis d'une probabilité de réalisation.

Les scénarios englobent également des combinaisons et des extensions de processus dans des zones stables, non touchées a priori. Exemple: l'érosion de la berge d'un torrent provoque un glissement de terrain, il se forme une digue qui entrave l'écoulement de l'eau, puis la digue cède brusquement et de grands volumes d'éléments solides sont transportés vers l'aval sous la forme de matériaux charriés ou de laves torrentielles. Ainsi, celles qui ont touché la région de Brienz lors des intempéries de 2005 sont essentiellement imputables à des mouvements de terrain.

2.10.1 Élaboration des scénarios

Il est important d'adopter une perspective large pour élaborer les scénarios. Même les déroulements les moins probables ne doivent pas être exclus de l'étude sans motif. Comme les crues liées aux intempéries d'août 2005 l'ont montré, les processus à effet de seuil, les transitions de processus et les enchaînements de processus qui sortent de l'expérience locale doivent aussi être pris en considération («penser à l'impensable»). Les scénarios et les processus peu probables sont donc également examinés.

Les scénarios doivent être assez représentatifs pour traiter et montrer ouvertement toutes les évolutions envisageables. Ils doivent tenir correctement compte des effets possibles sur le potentiel de dommages. La chronologie des événements joue parfois un rôle déterminant.

2.10.2 Choix des scénarios

Même avec de bonnes bases scientifiques, de bons modèles d'estimation et de calcul et de bonnes aides techniques, l'élément décisif permettant d'assurer la qualité de l'évaluation des dangers est en définitive une représentation claire du déroulement possible des processus. Dans la pratique, il y a lieu de concevoir des scénarios qui décrivent les effets des processus dans le périmètre touché de manière suffisamment représentative pour fonder valablement l'évaluation des dangers et la planification des mesures de protection.

L'argumentation et les motifs de la sélection ou non d'un scénario doivent être énoncés de façon transparente pour que les choix effectués puissent être reproduits ultérieurement. C'est pourquoi la détermination de la probabilité d'occurrence et de l'intensité des glissements de terrain, chutes ou coulées de boue doit reposer sur des bases solides (voir les points précédents).

L'évaluation des dangers a autant besoin de considérations qualitatives que de calculs. C'est pourquoi les rapports techniques doivent être détaillés et développer toutes les réflexions qui ne seraient sinon plus compréhensibles par la suite.

Les calculs inhérents aux divers scénarios sont entachés d'incertitudes, dont la gestion est décrite au paragraphe suivant.

2.11 Gestion des incertitudes

La détermination de l'intensité et de la probabilité d'occurrence des processus naturels est entachée d'incertitudes, qui croissent lorsque les événements examinés sortent de l'expérience acquise. Ces incertitudes se répercutent naturellement sous forme d'imprécisions dans l'évaluation des dangers et la planification des mesures qui en découle. Il en résulte une certaine marge d'appréciation que les protagonistes doivent prendre en compte.

Il est impossible de décrire exhaustivement tous les déroulements envisageables des événements. L'incidence effective des processus dans un périmètre donné réserve toujours des surprises, qui influencent autant l'évaluation des dangers et la planification des mesures que l'établissement des plans d'urgence. Un événement peut comprendre une grande diversité de phases qui s'amplifient brusquement, évoluent de manière surprenante ou se déroulent autrement que prévu.

Diversité des événements

Les incertitudes affectant un processus qui bénéficie de nombreuses observations continues peuvent être quantifiées à l'aide d'outils statistiques, comme les intervalles de confiance. Cette méthode s'applique essentiellement aux événements fréquents. La probabilité d'occurrence fournit alors l'intensité couplée en l'assortissant d'une incertitude fondée sur des analyses statistiques (fig. 12).

Il est recommandé d'estimer et d'exposer, autant que faire se peut, la variabilité possible des mouvements de terrain même si les données disponibles sont éparses. Les grands volumes et les grandes vitesses font l'objet d'extrapolations lorsque le cadastre ne comprend que des événements fréquents de faible intensité et que les levés de terrain indiquent l'éventualité d'un événement de grande ampleur.

L'extrapolation en direction des événements très rares requiert une prudence particulière, car ils impliquent des processus à effet de seuil, de même que des transitions et enchaînements de processus qui ne sont pas appréhendés par les données disponibles (fig. 13). L'incertitude inhérente à ces événements sera donc estimée. Les scénarios les décrivant doivent être bien motivés et documentés.

Fig. 12 > Répartition de l'intensité pour une probabilité d'occurrence donnée

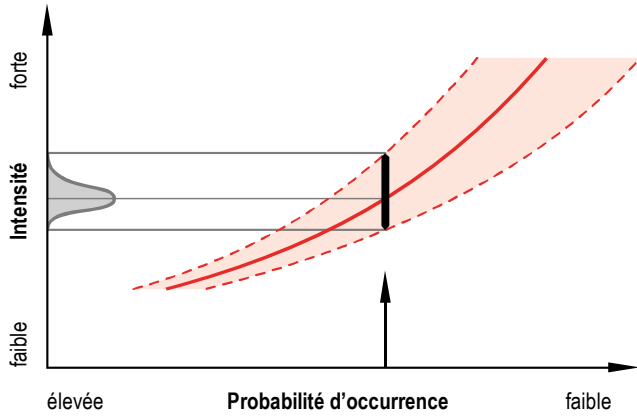
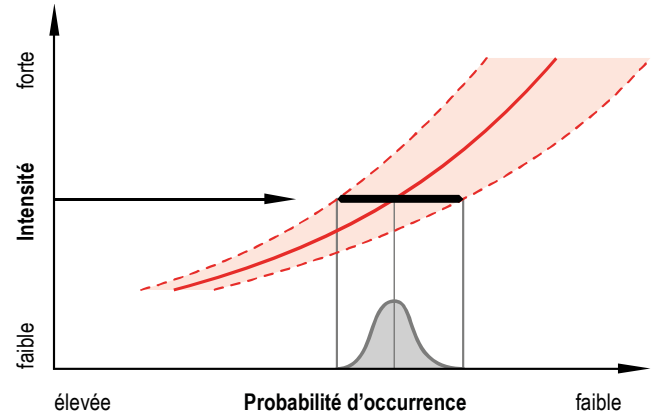


Fig. 13 > Répartition de la probabilité d'occurrence pour une intensité donnée



3 > Besoin d'agir

La loi fédérale sur les forêts a notamment pour but de contribuer à protéger la population et les biens d'une valeur notable contre les glissements de terrain, l'érosion et les chutes de pierres (art. 1, al. 2, LFo). Ce chapitre décrit la méthode préconisée pour établir le besoin d'agir à ce sujet.

Lorsqu'un périmètre donné est exposé à un danger, les risques qui en découlent doivent être évalués. Après avoir déterminé ces risques, le niveau de sécurité actuel est comparé avec les objectifs de protection, ce qui permet d'établir un éventuel besoin d'agir et de fixer des priorités. La démarche à suivre pour planifier ensuite des mesures est exposée au quatrième chapitre.

3.1 Détermination des risques

La première étape comprend une analyse de l'exposition à tous les processus naturels dangereux, sachant que les risques affectant un périmètre donné dépendent de l'ensemble des effets possibles d'un ou plusieurs processus sur le potentiel de dommages. La deuxième étape consiste à en analyser les conséquences pour les personnes et les biens d'une valeur notable. Puis les risques sont déterminés dans un troisième temps.

Les risques peuvent être établis d'une manière plus ou moins détaillée:

- a) Détermination qualitative: quels objets ou surfaces sont menacés, par quelles intensités pour des périodes de retour données? Quel est leur nombre?
- b) Analyse quantitative: détermination de l'ampleur des dommages possibles pour chacun des objets menacés, en tenant compte de la probabilité d'occurrence spatiale des processus, de la létalité et de la vulnérabilité de ces objets. Les risques encourus par les personnes sont calculés en considérant notamment le taux d'occupation moyen, la vitesse moyenne de déplacement et le temps de présence effectif. On distingue le risque individuel et le risque collectif. Les risques matériels sont calculés en appliquant la valeur effective des objets menacés (dommages directs). Les biens matériels à protéger suivants sont pris en compte: bâtiments, infrastructures, objets d'une grande importance économique, ressources vitales et biens culturels. Les dommages indirects ne sont pas calculés de manière standardisée pour toutes les composantes concernées. L'évaluation des dommages indirects peut s'avérer importante lors d'interruptions de longue durée avec dommages consécutifs élevés (p.ex. trafic interrompu sur un grand axe de communication).

En général, le risque pour les personnes est évalué en considérant le risque individuel et le risque collectif. Le risque individuel décrit l'ampleur du risque de décès encouru par une personne exposée à un danger. Le risque collectif peut être élevé même lorsque

le risque individuel affectant chaque personne est faible (p. ex. grand nombre de victimes).

3.2 Niveau de sécurité et objectifs de protection

Le besoin d'agir est examiné au terme de l'évaluation des risques: sont-ils supportables pour la société ou doivent-ils être atténués? Une tâche essentielle consiste à fixer la limite entre les risques acceptables et les risques inacceptables. Le niveau de sécurité visé exprime l'état de sécurité souhaité. En posant des objectifs de protection, les protagonistes définissent le niveau de sécurité qu'ils souhaitent atteindre dans leur domaine de compétence et leur contribution en vue d'atteindre ce niveau de sécurité. Le domaine de responsabilité des divers protagonistes diffère largement. La présente aide à l'exécution porte sur la responsabilité institutionnelle (p. ex. pouvoirs publics, entités chargées d'appliquer la loi sur les forêts). Elle ne touche donc pas au domaine de la responsabilité individuelle, dans lequel il incombe aux intéressés d'assurer eux-mêmes leur protection (p. ex. alpinistes sortant du cadre institutionnel).

Un concept de mesures est établi lorsqu'un besoin d'agir a été identifié. Il montre si les risques peuvent être atténués à un coût raisonnable. Les protagonistes attribuent des objectifs aux mesures envisagées dans cette phase. La prise en compte des cartes des dangers dans l'aménagement du territoire est une tâche permanente dans les périmètres menacés, quelles que soient par ailleurs les mesures constructives de protection envisagées (besoin d'agir au sens large). Cela permet de maintenir un état de risque donné et de prévenir l'augmentation des risques dans le meilleur des cas.

Niveau de sécurité visé

La Confédération souhaite assurer dans toute la Suisse un niveau de sécurité comparable face à tous les dangers naturels qui soit écologiquement admissible, économiquement proportionné et socialement acceptable.

Le niveau de sécurité visé se réfère aux effets directs des dangers naturels sur les biens à protéger suivants:

Les dangers naturels n'accroissent pas la mortalité moyenne des personnes. Le risque annuel moyen de décès causé par des dangers naturels est largement inférieur à la probabilité moyenne de décès inhérente à la classe d'âge qui a la mortalité la plus faible en Suisse.

Personnes

Bâtiments

Les bâtiments offrent une bonne protection aux personnes et aux biens qu'ils abritent. Ils sont résistants et ne présentent aucun danger pour les personnes et pour les biens. Les risques résiduels encourus par les personnes et par les biens sont supportables pour les entités qui doivent les assumer.

Biens d'une valeur notable

Infrastructures, objets d'une grande importance ou incidence économique, ressources vitales

Les risques encourus par les infrastructures, les objets importants pour l'économie et les ressources naturelles vitales pour les personnes sont si faibles que la pérennité de la collectivité est assurée, aujourd'hui comme pour les générations à venir. Des biens et des services d'une importance vitale ne peuvent faire défaut dans une grande partie de la Suisse que pendant un court laps de temps.

Biens culturels

Les biens culturels sont protégés contre les dangers naturels de manière à ce que leur valeur culturelle soit préservée durablement.

Il existe d'autres valeurs auxquelles aucun niveau de sécurité visé n'est assigné, notamment les animaux de rente. La législation suisse leur accorde une grande importance et ne les considère pas seulement comme des biens matériels; leur protection incombe toutefois à leur propriétaire.

Objectifs de protection

Les objectifs de protection expriment en termes quantitatifs la contribution d'une entité assumant une responsabilité en vue d'atteindre le niveau de sécurité visé. Les pouvoirs publics les utilisent pour identifier les domaines requérant une intervention de leur part. On parle de «déficit de protection» lorsque les objectifs ne sont pas atteints. Les pouvoirs publics étudient alors si des mesures appropriées sont susceptibles d'atténuer les risques. Dans la pratique, les objectifs de protection servent aussi de critères pour évaluer le besoin d'agir. Seules les autorités compétentes peuvent assigner des objectifs de protection aux pouvoirs publics. Ils doivent être fixés en tenant compte de la structure fédéraliste de la Suisse, qui octroie une grande autonomie aux communes et aux cantons, ainsi que des spécificités de la démocratie directe.

De nombreux cantons ont élaboré des matrices des objectifs de protection à cet effet. L'annexe A5 en présente un exemple (ARE et al. 2005). Dans le cadre des projets individuels selon le manuel RPT (OFEV 2011), l'Office fédéral de l'environnement applique le critère du risque individuel de décès: un projet avec un risque dépassant 10^{-4} à 10^{-5} par an satisfait au critère d'examen. L'Office fédéral des routes a aussi fixé des critères d'examen applicables aux routes nationales: risque individuel de décès supérieur à 10^{-5} par an, risque par tronçon de 100 m supérieur à 10000 francs par an, risque par source de processus dangereux supérieur à 10000 francs par an.

Objectifs des mesures

La mise en œuvre de mesures appropriées a pour but de diminuer ou d'éliminer les déficits de protection existants. La sécurité atteinte correspond à l'effet cumulé de toutes les mesures (d'aménagement du territoire, techniques et d'organisation). Les entités assumant une responsabilité assignent des objectifs aux mesures qu'elles prévoient de prendre contre les dangers naturels. Elles se réfèrent aux objectifs de protection, mais elles ont le droit de les réexaminer et de les ajuster de manière motivée vers le bas ou vers le haut lors de l'optimisation réalisée dans le cadre de la planifica-

tion intégrée des mesures. Les autorités fixent dans cette phase les priorités relevant du domaine institutionnel, en accordant la même importance à tous les volets du développement durable. Dans certains cantons, le critère appliqué sera par exemple la disponibilité des routes cantonales et communales.

Il est permis d'atteindre un niveau de sécurité supérieur à celui qui était visé, pour autant que cela soit justifié d'après les critères du développement durable. La Confédération vérifie alors comme d'habitude si le montant des mesures prévues est justifié. Le risque résiduel accepté est endossé par différents protagonistes.

Dans certains cas bien fondés, le niveau de sécurité atteint peut aussi être inférieur à celui qui était visé. Il arrive en effet que le déficit de protection ne puisse pas être comblé moyennant une dépense raisonnable ou que les impératifs du développement durable ne soient pas satisfaits. Par exemple, la protection de la nature et du paysage prend parfois le pas sur la diminution des risques. Dans une telle situation, il est nécessaire d'examiner différentes options pour trouver une solution optimale et durable. Les objectifs assignés aux mesures prévues dans le cadre d'un projet peuvent alors s'écarter des objectifs de protection. Ils sont déterminés dans le cadre de la planification des mesures en soupesant soigneusement les intérêts en jeu. C'est ainsi que les objectifs doivent également être différenciés et échelonnés à l'intérieur des projets. Outre l'utilisation du territoire, il faut aussi tenir compte du type de danger, par exemple de son intensité, de sa fréquence saisonnière et du délai de préalerte correspondant.

3.3 Risque résiduel

Les risques ne peuvent jamais être éliminés totalement. Un certain risque, qualifié de «résiduel», subsiste généralement. Il faut en faire part aux intéressés de manière transparente pour éviter qu'ils se fassent une idée erronée du niveau de sécurité dont ils bénéficient. On les incitera également à assumer une certaine responsabilité individuelle.

La fig. 14 représente schématiquement le risque avant et après la réalisation de mesures de protection. Au début, le risque est excessif et se situe au-dessus de l'objectif de protection. L'objectif de protection n'est donc pas atteint. Le risque est atténué lorsque toutes les mesures prévues ont été mises en œuvre par les pouvoirs publics et les particuliers. Les mesures portent notamment sur l'aménagement du territoire, la construction d'ouvrages et l'organisation, et elles sont harmonisées dans le cadre d'un concept de protection (voir § 4.4 ss). Le risque est moindre une fois les mesures appliquées. Dans l'exemple présenté ici, la diminution du risque comprend une part servant à atteindre l'objectif de protection (①) et une part servant à atteindre l'objectif des mesures (②). La répartition de ces parts est variable et doit être adaptée de cas en cas. Le risque restant après l'exécution des mesures est en deçà du niveau de sécurité visé. La sécurité atteinte tombe désormais dans le domaine acceptable, mis en évidence en vert. Le risque résiduel sera supporté par les différents protagonistes (assurances, propriétaires, etc.). La sécurité atteinte doit être maintenue sur le moyen et le long terme (entretien, aménagement conséquent du territoire, organisation assurée en cas d'urgence, etc.).

4 > Mesures

Il faut prendre des mesures afin de protéger les personnes et les biens d'une valeur notable lorsqu'un besoin d'agir a été identifié. Les mesures sont optimisées en fonction de critères sociaux, économiques et écologiques (art. 1 et 19 LFo, art. 15 à 17 OFo). La Confédération alloue aux cantons des indemnités pour les mesures de protection contre les dangers naturels (art. 36 LFo).

4.1 Optimisation des mesures de protection

La planification des mesures de protection se fonde sur les résultats de l'évaluation des dangers et de l'appréciation des risques. Leur but peut être le maintien de l'état existant en l'absence de déficit de protection ou son amélioration lorsqu'un déficit de protection est constaté. Tous les types de mesures – passives, actives et organisationnelles – doivent être pris en compte (fig. 15).

Lorsqu'on planifie des mesures de protection, il faut distinguer celles qui agissent sur l'ampleur des dommages et celles qui agissent sur le processus lui-même. Les mesures passives et actives sont décrites ci-après par ordre de priorité.

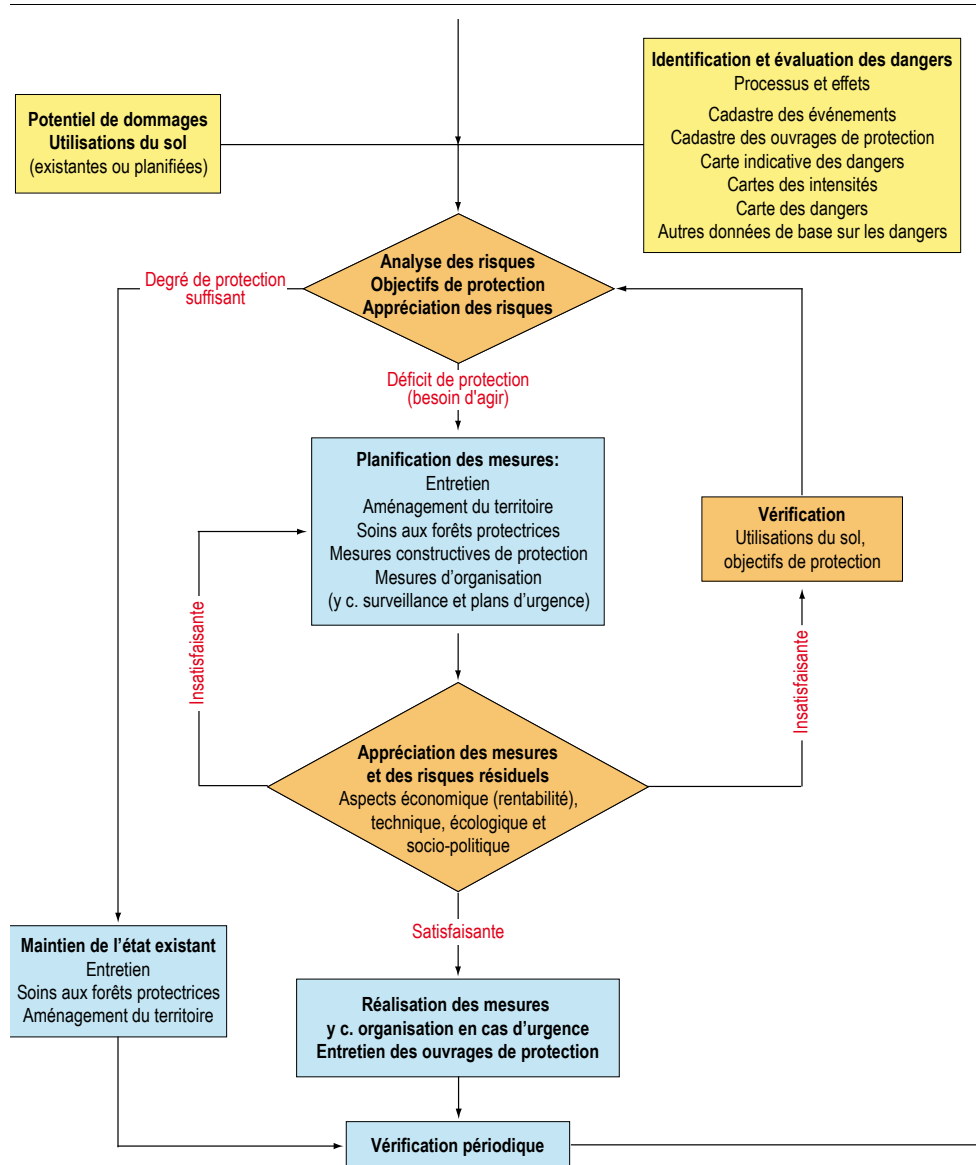
Les mesures passives atténuent l'ampleur des dommages éventuels sans influencer le déroulement des événements (ARE et al. 2005). Les cantons tiennent compte des documents de base (cartes des dangers) dans toutes les activités touchant l'organisation du territoire, en particulier dans l'établissement des plans directeurs et d'affectation (art. 15, al. 3, et art. 17, al. 1, OFo). L'ampleur des dommages potentiels doit être réduite en premier lieu en prenant des mesures d'aménagement du territoire. Leur but est d'assurer une prise en compte adéquate des dangers naturels dans l'utilisation du sol. Un mode de construction adapté aux dangers en fait également partie. La protection des objets peut être garantie en imposant des mesures appropriées dans la procédure d'octroi de permis de construire (p. ex. Egli 2005). Les prescriptions à ce sujet sont fixées dans le plan d'affectation.

Les mesures actives influencent le déroulement des processus. La sécurisation des périmètres menacés comprend des mesures constructives, des travaux contre les glissements de terrain, des drainages et des mesures de protection contre les processus de chute (art. 17, al. 1 à 2, OFo). Les mesures actives peuvent revêtir la forme d'ouvrages ponctuels, tels que filets pare-pierres, ou de mesures surfaciques, telles que soins aux forêts protectrices, boisements ou drainages. Des ouvrages de protection peuvent être réalisés dans les périmètres qui font déjà l'objet d'une utilisation méritant d'être protégée ou dont l'affectation doit impérativement être modifiée une fois pesés tous les intérêts en jeu. Lorsque des digues ou des ouvrages de rétention de grande envergure sont érigés pour lutter contre des dangers naturels gravitaires, il faut vérifier s'ils tombent sous le coup de la loi fédérale sur les ouvrages d'accumulation (LOA) (annexe A1).

Cette loi s'applique aux ouvrages d'accumulation dont la hauteur de retenue au-dessus du niveau du thalweg (ou du niveau d'étiage) est de 10 m au moins ou dont le volume de retenue est supérieur à 50000 m³ et la hauteur de retenue atteint 5 m au moins. L'autorité fédérale de surveillance peut également y assujettir des ouvrages d'accumulation de dimensions plus modestes qui présentent un risque potentiel particulier (art. 2 et 22 LOA). Un tel risque existe lorsque des vies humaines sont menacées ou que d'importants dommages matériels sont à craindre en cas de rupture (art. 2 OSOA).

Fig. 15 > Procédure à suivre pour planifier et réaliser des mesures

Il est nécessaire de suivre pas à pas une démarche préétablie – de la compréhension des processus jusqu'à l'établissement des plans d'urgence – pour se protéger de manière optimale et durable contre les mouvements de terrain.



Le choix des mesures de protection adéquates doit se faire en respectant le principe de proportionnalité. Il faut donc commencer très tôt à élaborer plusieurs variantes de natures différentes pour être à même de comparer constamment leurs avantages et leurs inconvénients. Toute mesure prévue doit atteindre le but visé moyennant un minimum d'intervention. Elle doit aussi être socialement supportable.

Le coût des mesures de protection est mis en regard des dommages à craindre si elles ne sont pas réalisées. La Confédération met à disposition le logiciel EconoMe à cet effet. Tout projet individuel arrêté par la Confédération doit justifier sa rentabilité par le biais d'EconoMe. Lorsqu'une mesure est jugée positivement, sa réalisation peut être décidée. Les projets de protection peu rentables ou inadéquats ne donnent droit à aucune indemnité ni aide financière de la part de la Confédération.

Les cantons veillent à planifier les mesures de protection de manière intégrée, en tenant notamment compte des intérêts de la gestion forestière, de la protection de la nature et du paysage, de la construction hydraulique et de l'agriculture (art. 17, al. 3, OFo). Les mesures envisagées sont donc aussi évaluées sous l'angle écologique. Les paysages protégés ou dignes de l'être ne peuvent pas être altérés par des aménagements ou, alors, ces interventions auront un impact minime, conformément à la législation en vigueur et aux objectifs spécifiquement assignés à la protection de la nature et du paysage. Les inventaires et les prescriptions d'importance nationale, cantonale ou régionale (p. ex. Inventaire fédéral des paysages, sites et monuments naturels d'importance nationale, IFP) seront aussi respectés. L'état des sites ne doit pas être dégradé, mais au contraire amélioré durablement, dans toute la mesure du possible, lorsque l'occasion s'en présente. Les objectifs de protection des personnes et des biens peuvent donc être modifiés pour des raisons écologiques autant que financières ou techniques. L'éventuelle pesée des intérêts observera le cadre légal en vigueur.

Les mesures d'organisation servent à limiter le risque résiduel. L'organisation en cas d'urgence, les stations de mesures, les services d'alerte (art. 16 OFo), les évacuations, l'aide en cas de catastrophe et autres mesures temporaires relèvent notamment de cette catégorie. Les mesures d'organisation font partie intégrante d'une planification exhaustive des mesures.

Pour en savoir plus

- > *EconoMe* (www.econome.admin.ch)
- > *Norme SIA 261/1 «Actions sur les structures porteuses – Spécifications complémentaires»*
- > *Recommandations «Protection des objets contre les dangers naturels gravitationnels» (Egli 2005)*
- > *Romang H. (éd.) 2008: Efficacité des mesures de protection. Stratégie «Dangers naturels» Suisse. Projet A 3. Plate-forme nationale «Dangers naturels» PLANAT, Berne*

4.2 Phases de planification

Le modèle de prestations de la Société suisse des ingénieurs et des architectes (SIA) englobe tout le cycle de vie des ouvrages, de l'énoncé des besoins jusqu'à l'exploitation. L'enchaînement des prestations des mandataires et du mandant définies par le plan des phases, et des décisions correspondantes du mandant présente les caractéristiques d'un modèle et devra être adapté de cas en cas lors de la mise en œuvre. La séquence de phases principales sera modifiée le moins possible:

- > définition des objectifs,
- > études préliminaires,
- > étude du projet, établissement du projet de construction,
- > appel d'offres,
- > réalisation,
- > exploitation.

Les expériences réunies jusqu'ici ont indiqué que l'application des principes suivants permet de planifier des projets dans les temps et de façon économiquement avantageuse:

- > Planifier et réaliser les projets dans une perspective exhaustive; cela s'applique aussi à la pesée des intérêts liée aux conflits éventuels entre divers objectifs.
- > Rechercher les solutions d'une manière transparente, en impliquant toutes les entités concernées et intéressées; cela favorise l'acceptation des projets (processus participatif).
- > Assumer ses responsabilités vis-à-vis des territoires contigus (au-delà des limites communales, cantonales ou nationales).

Les projets, avec leurs phases principales et partielles, se déroulent conformément au modèle de prestations de la SIA. Les différentes étapes sont traitées à un niveau de détail qui varie selon la complexité et l'ampleur des projets, ou en fonction de l'urgence des mesures qu'ils comportent (mot clé «mesures d'urgence»).

Pour en savoir plus

- > *Norme SIA 103 «Règlement concernant les prestations et honoraires des ingénieurs civils»*
- > *Norme de compréhension SIA 112 «Modèle 'Étude et conduite de projet'»*
- > *Manuel sur les conventions-programmes conclues dans le domaine de l'environnement (OFEV 2011)*

4.3 Entretien des ouvrages

L'entretien des ouvrages de protection est aussi important que leur construction. Sans entretien, les mesures perdent de leur efficacité et le danger peut réapparaître. Lorsqu'un ouvrage de rétention cède, la menace peut même être plus grande qu'avant

sa construction. Un entretien régulier permet de déceler les points faibles et les défauts. Il faut notamment déblayer ou rétablir les espaces de rétention à l'issue d'un événement. L'entretien est donc une tâche permanente. Il est réalisé, financé ou surveillé par les cantons, les communes et les maîtres d'ouvrages, conformément à la législation en vigueur.

La nature, l'ampleur et la fréquence de l'entretien dépendent des particularités locales. Tous les travaux doivent être effectués d'entente avec les propriétaires fonciers et avec les services cantonaux spécialisés.

Les projets d'ouvrages de protection doivent comprendre un plan d'entretien approprié, car les contraintes qui lui sont liées sont susceptibles d'influencer le choix des mesures. Le curage répété d'un dépotoir à alluvions ou d'un filet pare-pierres finit par coûter cher si l'ouvrage est sollicité fréquemment. Le choix des mesures doit donc en tenir compte sous l'angle économique comme technique.

Stratégie d'entretien

Le plan d'entretien permet aussi de distinguer ce qui a trait à la construction et à la maintenance des ouvrages, et d'assurer une réalisation adéquate des futurs travaux d'entretien. Il régleme les procédures et les compétences:

- > Qui assume l'entretien et les coûts?
- > Qui contrôle les ouvrages de protection?
- > Quel est l'intervalle entre les contrôles et les inspections?
- > Quand et comment les travaux d'entretien nécessaires sont-ils réalisés?

Le contrôle de l'entretien dépend des caractéristiques de l'ouvrage concerné. Les travaux d'entretien réguliers peuvent être techniquement exigeants ou très onéreux selon le type d'ouvrage.

Entretien

Dans les secteurs en glissement, les drainages risquent d'être endommagés ou cisailés par des mouvements résiduels. Un contrôle régulier est nécessaire pour s'assurer qu'ils fonctionnent correctement. On a constaté que l'efficacité de nombreux systèmes de drainage diminue petit à petit, notamment lorsqu'ils équipent des lithologies à grain fin. La formation de concrétions ou la pénétration de racines peuvent aussi poser des problèmes.

L'entretien et le contrôle des filets pare-pierres sont des tâches permanentes. Lorsque des ouvrages sont érigés contre les chutes de pierres et de blocs, il ne faut pas seulement vérifier périodiquement les dispositifs eux-mêmes, mais aussi surveiller la situation de danger. Cette surveillance préventive permet de repérer l'aggravation éventuelle d'un danger et de prendre à temps des mesures complémentaires. La vérification des ouvrages de protection consiste également à consigner l'activité de chutes de pierres. Certains éléments structurels subissent parfois des contraintes lorsqu'une grande quantité de matériel s'accumule derrière l'écran. Les pierres retenues seront évacuées régulièrement si elles diminuent progressivement la capacité de rétention initiale de l'ouvrage. Quand les impacts sont violents, on passe graduellement à des travaux de remise en état et il faut remplacer le cas échéant des piliers, des freins, des haubans ou des plaques de base.

Lorsqu'un ouvrage de protection est installé sur un terrain privé, son fonctionnement doit être expliqué au nouveau propriétaire en cas de mutation, ce qui requiert des efforts et des exigences formelles supplémentaires. L'entretien de l'ouvrage doit aussi être assuré ou toléré par le nouveau propriétaire; dans le cas contraire, cet ouvrage pourrait être simplement supprimé, par exemple pour des raisons esthétiques ou par ignorance. L'entretien est réglementé de manière contraignante en en faisant mention dans le registre foncier.

4.4 **Mise en œuvre en matière d'aménagement du territoire**

En vertu de la législation sur l'aménagement du territoire, sur l'aménagement des cours d'eau et sur les forêts, les cantons et les communes doivent tenir compte des documents de base sur les dangers dans toutes les activités qui ont des effets sur l'organisation du territoire (art. 15, al. 3, OFo). Cela s'applique notamment à l'établissement des plans directeurs et des plans d'affectation et à l'octroi des permis de construire. Les cantons veillent à ce que la planification soit exhaustive; elle respectera notamment les intérêts de l'aménagement du territoire (art. 17, al. 3, OFo).

L'aménagement du territoire est l'un des volets de la gestion intégrée des risques et il contribue grandement à la prévention. D'après la loi sur l'aménagement des cours d'eau, les mesures y relatives ont priorité sur les autres. Il garantit une affectation appropriée des surfaces menacées et participe ainsi à la réduction des risques. Dans les secteurs menacés, les mesures d'aménagement du territoire ont pour but d'atténuer les risques existants (p. ex. en diminuant la vulnérabilité du bâti ou les dommages potentiels) ou de prévenir l'apparition de nouveaux risques (p. ex. en renonçant à de nouvelles affectations ou en prononçant des interdictions de construire).

Une mise en œuvre des documents de base sur les dangers orientée sur les risques tient compte de la nature des menaces, des processus déterminants, des affectations du sol existantes et prévues et des autres intérêts de la collectivité. Un aménagement du territoire orienté sur les risques est une mesure de protection non seulement efficace à long terme, mais également avantageuse du point de vue financier. L'aménagement du territoire peut apporter une contribution supplémentaire en maintenant libres de constructions les surfaces nécessaires pour réaliser des ouvrages de protection et des mesures techniques, aménager des couloirs d'écoulement, retenir des processus dangereux et réserver des zones tampons autour des périmètres menacés. Il est très efficace et rentable lorsqu'il exploite toutes les possibilités qui lui sont offertes pour limiter au maximum les dommages potentiels.

Des ouvrages de protection sont érigés pour assurer la défense contre les processus naturels. Mais les risques encourus par les personnes et par les biens ne sont réduits durablement que s'ils ont l'effet escompté lors d'un événement. Les ouvrages de protection devraient déployer en permanence (durant environ 50 ans) des effets quantifiables avec une marge de sécurité appropriée. Ils sont construits d'abord pour augmenter la sécurité et ensuite seulement pour abaisser le degré de danger figurant sur la carte. Ils ne peuvent être pris en compte dans l'évaluation des dangers qu'une fois réceptionnés et non pas lorsqu'ils sont en cours de planification. Leur intégration dans

l'aménagement du territoire tiendra compte de tous les intérêts en jeu (élaboration d'une carte des dangers incluant les ouvrages réalisés). La transposition des cartes de danger avec prise en compte des ouvrages de protection selon des principes homogènes (unité de doctrine) constitue un défi majeur.

Recommandation de 2005 (ARE et al. 2005)

En publiant la recommandation intitulée «Aménagement du territoire et dangers naturels» (ARE et al. 2005), la Confédération a posé les principes d'une mise en œuvre appropriée et durable de la documentation sur les dangers. Ces instructions sont utilisées pour établir les plans directeurs et les plans d'affectation, délimiter les zones (voir annexe A4) et octroyer les permis de construire en fonction des dangers. Les deux dernières procédures tiendront aussi compte des responsabilités respectives et de réflexions portant sur les risques encourus.

L'expérience montre que des mesures simples et peu onéreuses permettent d'atténuer d'importants risques matériels, même en zone de sensibilisation (périmètres jaunes et en hachuré jaune-blanc). Dans ces zones et dans les autres, les risques encourus par les personnes peuvent être réduits en appliquant des mesures d'organisation (voir § 3.3). Elles ont une incidence considérable à un coût modéré.

Les degrés de danger reflètent essentiellement les conséquences des phénomènes naturels sur les constructions. Leur but est d'éviter que des vies humaines soient menacées et de limiter l'ampleur des dégâts matériels. Lorsque seules des cartes indicatives des dangers existent hors des zones à bâtir, il peut s'avérer nécessaire de préciser la menace et de déterminer le degré de danger (p.ex. lors de demandes d'agrandissement). L'échelle des degrés de danger ne s'applique pas directement aux activités de loisirs et de détente (p.ex. chemins de randonnée ou pistes de ski). Le besoin d'agir en cas de danger est surtout établi en analysant les risques.

Dans le cadre de la procédure d'octroi de permis de construire, les autorités compétentes examinent si un projet de construction respecte les prescriptions déterminantes, notamment les dispositions relatives à la protection contre les dangers naturels. Les conditions pouvant être posées aux constructions pour prévenir les dommages dus aux mouvements de terrain sont énumérées en annexe. On se référera aux recommandations de la Confédération (ARE et al. 2005) et de l'AEAI (Egli 2005) ainsi qu'aux normes SIA pour obtenir des informations complémentaires et prendre connaissance de conditions applicables à d'autres processus dangereux.

Pour en savoir plus

- > *Recommandation «Aménagement du territoire et dangers naturels» (ARE et al. 2005)*
- > *Norme SIA 261 «Actions sur les structures porteuses»*
- > *Recommandations «Protection des objets contre les dangers naturels gravitationnels» (Egli 2005)*

4.5 Soins aux forêts de protection et mesures sylvicoles

La sécurisation des périmètres menacés comprend notamment des mesures sylvicoles (art. 17, al. 1, let. a, OFo). La forêt protège les personnes et les biens contre les dangers naturels en empêchant les processus dangereux de se développer ou en atténuant leurs effets. La méthodologie des soins aux forêts de protection repose sur l'hypothèse qu'il existe un lien direct entre la réduction des risques et l'état de la forêt. L'état souhaité est défini en fonction des connaissances au sujet des dangers naturels et des conditions locales.

Les instructions pratiques intitulées «Gestion durable des forêts de protection – Soins sylvicoles et contrôle des résultats» («NaiS», abrégé du titre allemand, Frehner et al. 2005) indiquent, pour tous les processus naturels dangereux, les possibilités offertes par ces forêts et les exigences qu'elles impliquent.

Pour en savoir plus

- > *NaiS / Frehner et. al. 2005: Gestion durable des forêts de protection (projet NaiS); www.bafu.admin.ch/dangers-naturels > Informations pour spécialistes: eau, ... > Gestion des dangers naturels > Mesures > Forêts de protection*
- > *SilvaProtect-CH: Forêt protectrice en Suisse; www.bafu.admin.ch/dangers-naturels > Informations pour spécialistes: eau, ... > Situation de danger et ... > Données de base sur les dangers > SilvaProtectCH*

4.6 Mesures constructives pour contrer les processus de chute

La sécurisation des périmètres menacés comprend des travaux de défense et ouvrages de réception contre les chutes de pierres et les éboulements ainsi que le minage préventif de matériaux risquant de tomber (art. 17, al. 1, let. e, OFo). On peut dire de manière générale, concernant les cinq processus de chute (chute de pierres, chute de blocs, éboulement, écroulement, effondrement), que le nombre de mesures envisageables diminue avec la taille de la masse mobilisée (fig. 16). Il n'est guère possible de prendre des mesures constructives totalement efficaces pour assurer la protection contre un écroulement. Il en va en partie de même pour les effondrements en région karstique.

Il est revanche possible de prendre certaines mesures face à un éboulement imminent afin de réduire l'ampleur des dommages qu'il risque d'occasionner.

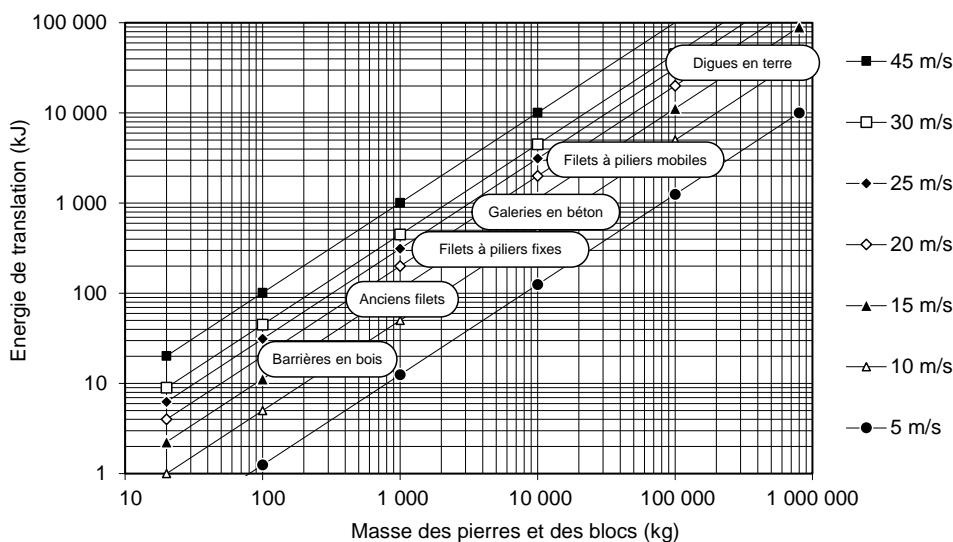
La conception des mesures de protection contre les processus de chute tient compte du type de mouvement, de la masse, de la taille, de la hauteur de rebond, de la vitesse et de l'énergie des composantes mobilisées. Elle nécessite aussi de connaître leurs trajectoires et leur répartition dans l'espace. Les cartes des dangers sont par contre insuffisantes pour dimensionner des ouvrages de protection, car elles indiquent en premier lieu l'énergie des corps en mouvement et la surface enveloppe de leurs trajectoires possibles. L'énergie cinétique maximale ne permet pas à elle seule de fixer les mesures à

mettre en œuvre. Elles dépendent également d'autres facteurs comme l'accessibilité, la place disponible et les contraintes liées à l'entretien. Le coût de la construction joue aussi un rôle décisif.

Les interventions envisageables sont subdivisées en fonction du déroulement des processus: mesures appliquées dans la zone d'arrachement (partie A), dans la zone de transit et de dépôt (partie B) et pour protéger des objets spécifiques, dites «mesures de protection d'objets» (partie C).

Fig. 16 > Énergie de translation liée aux processus de chute et domaines d'application de divers types d'écrans

L'énergie cinétique des projectiles comprend une composante translationnelle et une composante rotationnelle, cette dernière étant souvent égale à environ 20 % de l'énergie de translation. La figure représente l'énergie de translation, calculée en fonction de la vitesse et de la masse des pierres et des blocs. Le diagramme indique les énergies maximales que les divers ouvrages de protection sont capables d'absorber.



Les ouvrages de protection sont dimensionnés selon les règles de l'art de la construction, consignées en particulier dans les normes SIA. Certains types nécessitent toujours un calcul de la sécurité structurale et de l'aptitude au service pour tous les éléments constitutifs, et d'autres non. Les galeries de protection sont par exemple dimensionnées conformément à la directive de l'Office fédéral des routes (OFROU 2008). Celle-ci prescrit de calculer, à partir de l'énergie cinétique du bloc déterminant, une force statique de remplacement qui sera utilisée pour dimensionner chaque partie constitutive de la galerie. Les filets souples mis en œuvre doivent faire l'objet d'un certificat officiel, qui garantit leur qualité. Les acheteurs et les utilisateurs sont tenus, lorsqu'ils adjudgent un mandat, de fixer les exigences auxquelles les filets, leur montage, leurs ancrages et leurs fondations devront répondre. Les forces subies par les câbles porteurs, majorées de 30 %, sont généralement appliquées comme forces statiques de remplacement pour dimensionner les fondations et les ancrages des filets pare-pierres. Il faut, malgré cette majoration, toujours étudier les conséquences d'une surcharge, qui peut

être due à l'hétérogénéité de la roche, à une masse plus grande que prévu ou aux incertitudes affectant les calculs (voir § 2.11). Les recommandations concernant la construction sur le pergélisol (Bommer et al. 2010) s'appliquent aux ouvrages de protection érigés à haute altitude.

A Mesures appliquées dans la zone d'arrachement

Les mesures suivantes peuvent être appliquées dans la zone d'arrachement ou de production des chutes de pierres et de blocs afin de diminuer les dangers:

- > mesures sylvicoles et biologiques,
- > purge, minage,
- > recouvrement, filets plaqués, treillis,
- > clouage, ancrage, pilier, reprise en sous-œuvre («butons»).

B Mesures appliquées dans la zone de transit et de dépôt

- > mesures sylvicoles et biologiques, troncs abattus disposés en travers de la pente,
- > parois de protection comprenant des piliers en acier, filets pare-pierres, galeries de protection, digues de protection.

C Mesures de protection d'objets

Les mesures de protection d'objets sont généralement appliquées dans la structure des bâtiments existants. Le renforcement des murs est une mesure courante, qui doit s'accompagner de la suppression ou du renforcement des ouvertures ménagées pour les fenêtres et les portes. Selon la définition retenue, certains filets, murs ou digues proches d'une construction donnée sont parfois aussi comptés parmi les mesures de protection d'objets.

4.7 Mesures constructives pour contrer les processus de glissement

La sécurisation des périmètres menacés comprend des travaux contre les glissements de terrain et le ravinement, des drainages, des ouvrages de réception et des protections contre l'érosion (art. 17, al. 1, let. d et e, OFo). Les glissements de terrain ont des profondeurs, largeurs, longueurs et déclivités très variables. Ils présentent aussi des conditions géologiques, hydrogéologiques et topographiques hétérogènes. C'est pourquoi on peut les assainir de diverses manières, à choisir en fonction de la situation locale. La liste suivante (modifiée d'après Reuter et al. 1992) donne un aperçu des mesures envisageables pour améliorer la stabilité et la compacité du terrain:

- > Drainage superficiel ou profond (écoulement de l'eau par gravité ou à l'aide de pompes), dérivation des eaux superficielles en provenance de l'amont, limitation de l'infiltration.
- > Mesures constructives mécaniques:
 - ouvrages de soutènement (p. ex. murs de soutènement ou caissons en bois contre les glissements superficiels et semi-profonds),

- ancrages, tirants, clous, pieux, micropieux,
 - géotextiles,
 - filets plaqués ou suspendus,
 - étanchéification de la surface.
- > Modification de la topographie dans la zone d'arrachement (décharge) et au front du glissement (p. ex. freinage par surcharge).
 - > Amélioration des caractéristiques géomécaniques par substitution des matériaux.
 - > Mesures sylvicoles, confortement de pente en recourant au génie biologique, protection contre l'érosion (p. ex. dans les cours d'eau).

Les petites masses en glissement font souvent l'objet de mesures constructives. Les méthodes appliquées, courantes dans le génie civil et la géotechnique, sont décrites dans la littérature spécialisée. La conception de ces mesures exige de connaître les dimensions de la masse instable, en particulier la profondeur de la surface de glissement, ainsi que les caractéristiques des matériaux et les conditions hydrogéologiques locales. En général, ces indications ne figurent pas dans les cartes des dangers, si bien qu'il faut les acquérir pour planifier des mesures de niveau E3. Les mouvements du sol doivent aussi être différenciés précisément dans le temps et dans l'espace. Faute de données correctes, les mesures mises en œuvre risquent d'être insuffisantes ou surdimensionnées. Dans le premier cas, les dommages ultérieurs auront un coût et dans le deuxième, le coût de la construction est déjà excessif.

Des mesures constructives mécaniques sont mises en œuvre si nécessaire à grande échelle dans la zone d'arrachement des glissements, rocheux en particulier, pour autant qu'elles aient une incidence suffisante et présentent un rapport coût-efficacité favorable. Les ancrages et les tirants en rocher sont posés ponctuellement ou sur des surfaces. Les tirants courts et les chevilles en tubes d'acier sont plutôt appliqués sur des instabilités superficielles à semi-profondes. On distingue les types d'ancrages précontraints et non contraints. Les ancrages non contraints (aussi nommés tirants «lâches») sont posés dans les situations simples, sans grand déplacement. Ils ne transmettent les forces qu'à l'issue de petits mouvements postérieurs à leur mise en place. Les ancrages précontraints sont réalisés lorsqu'il faut prévenir tout mouvement. Leur tête est renforcée par une plaque ou une poutre en béton armé si les caractéristiques de la roche l'exigent. Il faut vérifier périodiquement les forces qu'ils subissent (voir § 4.10 concernant la surveillance).

Le drainage est une option fréquente dans les zones en glissement, quelle que soit leur taille. Le drainage recouvre toutes les manières de collecter et d'évacuer les eaux. Les méthodes et les techniques permettant d'agir sur les conditions hydrologiques et hydrogéologiques des glissements de terrain pour améliorer leur stabilité sont nombreuses et variées. Elles peuvent être regroupées en fonction de la tranche dans laquelle elles déploient leurs effets: en surface (p. ex. fossés de collecte des eaux superficielles), à faible profondeur (p. ex. tranchées drainantes) ou en profondeur (p. ex. galerie avec drains forés rayonnants ou puits filtrants) (fig. 17). La forêt, qui influence le cycle de l'eau, peut également jouer un rôle important dans le cadre de l'assainissement.

Drainage

Le guide pratique de l'OFEV intitulé «Glissements de terrain: hydrogéologie et techniques d'assainissement par drainage» (Parriaux et al. 2010) fournit des informations

techniques détaillées au sujet des possibilités offertes par le drainage et des exigences auxquelles il doit satisfaire. Les principes des modes d'applications typiques sont présentés ci-après.

L'assainissement hydrogéologique (drainage) a pour but de modifier artificiellement les conditions d'écoulement pour réduire les actions motrices de l'eau et augmenter les actions résistantes des matériaux. On peut obtenir ce résultat de deux manières:

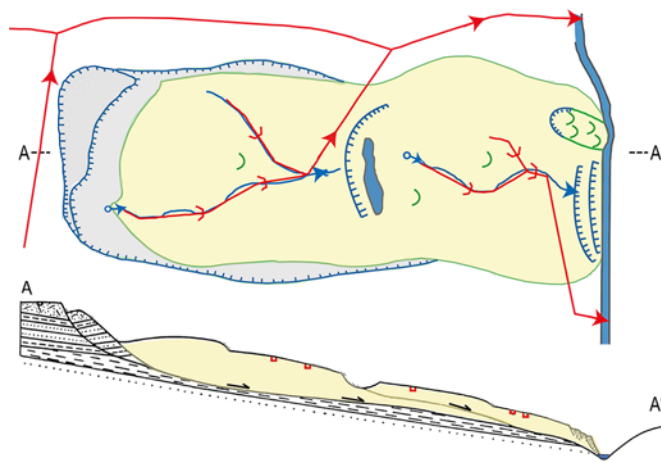
- > en diminuant les apports d'eau dans le sous-sol par la réduction des infiltrations à la surface, sur les côtés ou sous la masse glissée;
- > en abaissant par différentes techniques de drainage le niveau des eaux souterraines et la pression interstitielle dans la masse instable et/ou dans son substratum.

Principes de l'assainissement hydrogéologique

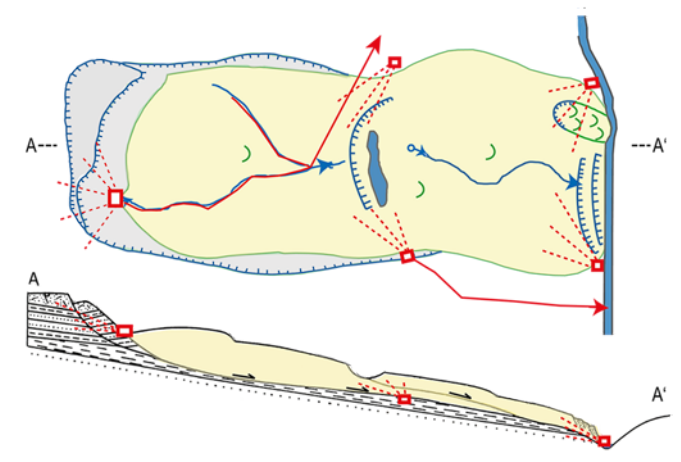
Fig. 17 > Schéma comparatif des principales méthodes d'assainissement hydrogéologiques

Vue en plan (en haut) et en coupe (en bas). Représentation schématique, ouvrages parfois projetés dans l'axe du dessin, la galerie est dessinée schématiquement à la surface du glissement dans la vue en plan D.

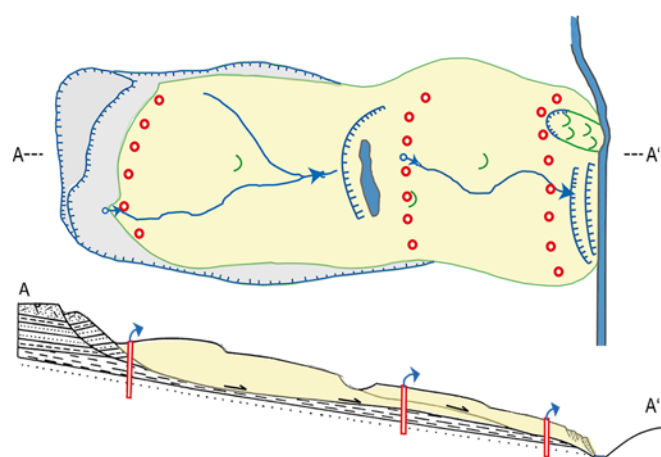
A: Fossés de collecte des eaux superficielles



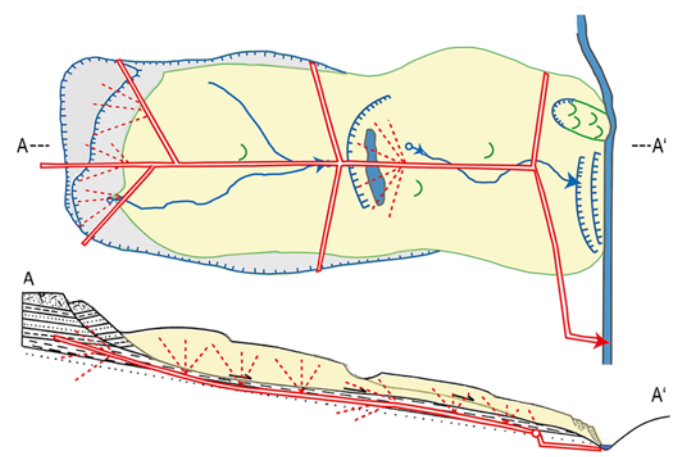
B: Drains forés subhorizontaux à vidange gravitaire



C: Rideaux de puits filtrants verticaux



D: Galerie avec drains forés rayonnants



D'une manière générale, tous les dispositifs de drainage agissent dans le sens d'une stabilisation du mouvement de glissement. Mais le drainage peut aussi induire des effets secondaires indésirables tels que tassements, accroissement local des forces de percolation, tarissement de sources, disparition de zones humides qui peuvent être protégées ou de certains ruisseaux. Le choix d'une technique de drainage appropriée est une démarche complexe qui implique plusieurs facteurs, notamment:

- > la taille et la géométrie de la masse en glissement à stabiliser,
- > les conditions géologiques et hydrogéologiques,
- > le temps nécessaire pour réaliser les mesures et pour obtenir un effet dans la masse en glissement,
- > l'efficacité et la longévité de la méthode mise en œuvre,
- > l'accessibilité et la place disponible,
- > l'impact sur l'environnement,
- > les risques (dommages potentiels),
- > le coût de l'entretien (sur le long terme),
- > les moyens financiers disponibles.

4.8 Mesures constructives pour contrer les processus d'écoulement

La sécurisation des périmètres menacés comprend des travaux contre les glissements de terrain et le ravinement, des drainages, des ouvrages de réception et des protections contre l'érosion (art. 17, al. 1, let. d et e, OFo). On distingue les mesures appliquées dans la zone d'arrachement, dans la zone de transit et de dépôt et pour protéger des objets spécifiques, comme dans le cas des processus de chute (voir § 4.6). Les interventions sont aussi différenciées selon leur mode d'action sur la masse en écoulement: les ouvrages de déviation en infléchissent la direction et les ouvrages de freinage (ou de blocage pour les petits volumes) en réduisent la vitesse (impact). Les paramètres suivants, qui décrivent les coulées de boue, entrent dans le dimensionnement des ouvrages de déviation et de freinage: vitesse, hauteur, volume et direction de l'écoulement, caractéristiques des matériaux (densité, granulométrie, taille des blocs, etc.), présence de bois ou de souches.

A Mesures appliquées dans la zone d'arrachement

Ces mesures à effet stabilisateur sont comparables à celles qui s'opposent aux glissements superficiels.

B Mesures appliquées dans la zone de transit et de dépôt et mesures de protection d'objets

On distingue les types de mesures suivants mis en œuvre dans la zone de transit et de dépôt:

- > rétention de la masse en mouvement en amont des biens potentiellement exposés (p. ex. à l'aide de filets ou de digues de protection contre les coulées de boue);
- > protection contre l'impact des coulées de boue sur les bâtiments (p. ex. à l'aide de murs ou de digues);

> déviation des coulées de boue à l'aide d'étraves, de murs déflecteurs ou de digues déflectrices.

Les mesures de protection d'objets englobent toutes les mesures de construction destinées à protéger un bâtiment particulier. Cette catégorie comprend notamment les mesures mises en œuvre directement sur le bâtiment.

4.9 Cas de surcharge

Il y a surcharge lorsqu'un processus naturel excède les capacités d'un ouvrage de protection ou d'un système intégré. L'événement dépasse alors les valeurs retenues lors du dimensionnement. Une chute de pierres peut par exemple présenter une énergie ou une hauteur de rebond supérieures aux valeurs de dimensionnement d'un filet pare-pierres. Le cas de surcharge peut également survenir lorsqu'un ouvrage ne fonctionne pas conformément aux attentes et aux prévisions.

La planification des mesures de protection doit tenir compte de diverses imprécisions et incertitudes: dynamique du processus, évolution inattendue, résultats de la modélisation, réaction d'un ouvrage à une sollicitation, succession d'événements, etc. Toutes ces incertitudes peuvent être prises en compte lors de l'optimisation des mesures de protection. Les ouvrages de protection sont dimensionnés sur la base du scénario déterminant (voir § 2.10) et pour l'événement dit «de dimensionnement».

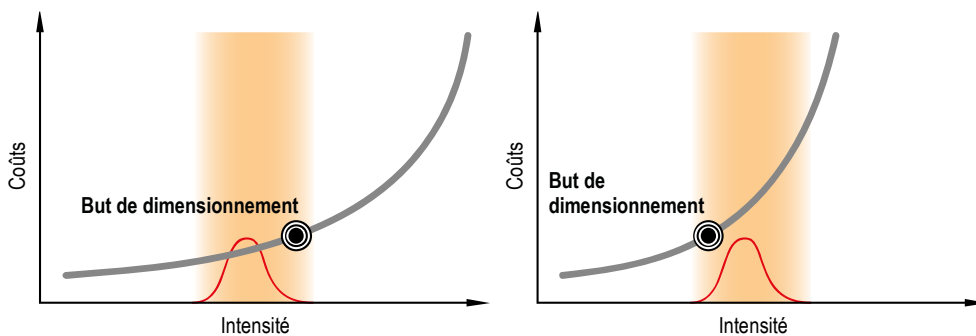
Le dimensionnement se fonde sur des valeurs tirées de la statistique des crues dans le cas des dangers hydrologiques et de la statistique des hauteurs de neige dans le cas des avalanches. Pour les mouvements de terrain, le choix du scénario déterminant, les objectifs de protection retenus et l'ampleur de la diminution des risques obtenue sont décisifs. La conception et le dimensionnement des ouvrages de protection doivent aussi tenir compte des conséquences possibles d'un événement et des dommages qu'il est susceptible d'occasionner (risques).

Quand le dimensionnement large d'une mesure ou d'un ensemble de mesures n'augmente pas considérablement le prix, on privilégie une conception permettant de résister à une charge du système située à la marge supérieure de la fourchette d'incertitude (à gauche dans la fig. 18). Mais si le coût augmente fortement à l'intérieur de la fourchette, on basera plutôt le dimensionnement sur une charge située à sa marge inférieure (à droite dans la fig. 18). Il faut encore tenir compte du fait que la probabilité d'occurrence est elle aussi entachée d'incertitude.

Si les objectifs de protection ne peuvent pas être atteints une fois les ouvrages de protection réalisés, la sécurité est accrue, conformément au principe de la gestion intégrée, en prenant d'autres mesures relevant de la surveillance, de l'organisation et de l'aménagement du territoire (voir chap. 3 et § 4.1, 4.4, 4.10 ss). La planification des mesures consiste donc aussi à en rechercher la combinaison optimale. De plus, toutes les mesures prévues devraient être adaptables à un contexte en mutation, tel qu'amplification des événements due au changement climatique, moyennant un investissement raisonnable.

Fig. 18 > Dimensionnement d'une mesure de protection en tenant compte de la fourchette d'incertitude

La courbe de distribution et la bande colorée en arrière-plan indiquent la fourchette d'incertitude afférente à l'intensité déterminante pour le dimensionnement. À gauche: dimensionnement correspondant au bord supérieur de la fourchette lorsque le surcoût de l'ouvrage est modéré. À droite: dimensionnement correspondant au bord inférieur de la fourchette lorsque le surcoût est notable.



Bezzola & Hegg 2008

Il faut toujours présenter ce qui se passe en cas de surcharge d'un système de protection. Les ouvrages ne doivent pas céder brusquement sous l'effet d'un événement supérieur aux valeurs retenues pour les dimensionner, car il en résulterait des processus incontrôlés et une brusque aggravation des dommages. Le fonctionnement des ouvrages existants et planifiés ainsi que leur comportement lorsqu'ils sont soumis à une surcharge (cas de défaillance) doivent donc être vérifiés systématiquement (voir § 2.4). Mais les mesures de protection contre les mouvements de terrain ne peuvent pas toujours être résilientes. On applique alors un système redondant ou assez robuste pour supporter des contraintes élevées sans céder et plus fiable en cas de forte charge (p. ex. une digue au lieu d'un filet pare-pierres).

La robustesse peut être définie comme l'aptitude d'un ouvrage et de ses composantes à limiter une dégradation ou une défaillance dans une mesure acceptable par rapport à la cause ayant provoqué ces dernières (d'après SIA 260). Cela signifie que la défaillance d'un élément de l'ouvrage ne doit pas entraîner la défaillance de son ensemble. Il faut donc veiller, lors de la phase de planification, à ce que l'action des processus naturels ne puisse pas entraîner un endommagement rapide ou généralisé de l'ouvrage, ou une défaillance totale. Selon le contexte, notamment en raison de limitations techniques ou financières, il peut être judicieux de prévoir des mesures complémentaires ou un système redondant pour limiter au maximum l'ampleur des dommages.

De plus, la mise en œuvre de mesures organisationnelles permet de diminuer considérablement, voire d'éliminer, les risques encourus par des personnes lorsque des mouvements de terrain menacent de se produire (voir § 4.10). Ces mesures peuvent être prises en complément aux autres afin de limiter les risques résiduels et de les ramener à un niveau acceptable. Mais les meilleures garanties de sécurité et de durabilité sont toutefois les mesures d'aménagement du territoire qui visent à laisser libres ou à libérer les surfaces et les couloirs touchés en cas de surcharge (art. 17, al. 3, OFo).

4.10 Mesures d'organisation et plans d'urgence

Dans les endroits où la protection de la population et de valeurs matérielles considérables l'exige, les cantons instituent des services d'alerte. Ils pourvoient à l'aménagement et à l'exploitation des stations de mesure et des systèmes d'information nécessaires (art. 16, al. 1, OFo). Nous ne serons jamais à même de nous protéger intégralement contre les mouvements de terrain. Les dangers potentiels ne sont ni entièrement calculables ni totalement contrôlables. Les événements naturels sont capables de dépasser l'intensité prise en compte lors de la conception d'un ouvrage, de survenir dans des endroits considérés jusqu'ici comme non exposés à des dangers, ou de toucher des périmètres non sécurisés.

Les mesures d'organisation sont destinées à limiter la gravité et la durée des situations de crise. Elles comprennent notamment la surveillance, l'alerte, l'alarme, la mise en œuvre des interventions planifiées, le sauvetage et la prise en charge des victimes. Des dispositions d'urgence sont appliquées juste avant un événement et pendant qu'il se produit. La préparation et la réalisation des mesures de maîtrise incombent en principe aux spécialistes des dangers naturels, aux organes de conduite et aux unités d'intervention. La protection de la population implique cinq organisations partenaires: la police, les sapeurs-pompiers, la santé publique, les services techniques et la protection civile. La maîtrise des événements requiert de leur part un engagement et une collaboration sans faille.

Il n'est pas toujours possible, pour des raisons techniques et économiques, de lutter avec des mesures constructives contre les mouvements de terrain, notamment contre les processus impliquant de grandes masses rocheuses. Lorsqu'un périmètre menacé ne peut pas être sécurisé complètement, la mise en œuvre de systèmes de surveillance, d'alarme et d'alerte permet néanmoins de protéger les personnes à un coût modéré.

De bonnes données de base sur les dangers sont nécessaires pour concevoir un système de surveillance. Si de tels documents font défaut, les processus, les dangers et les risques doivent préalablement être analysés.

Les systèmes de surveillance destinés à transmettre l'alerte ou l'alarme doivent être conçus et mis en œuvre en fonction des objectifs visés et au niveau approprié. Les étapes à suivre et les critères à appliquer sont décrits ci-après.

4.10.1 Systèmes de préalerte

La protection souhaitée et le but de la surveillance doivent être fixés à l'avance, car le concept de suivi en dépend largement. Les mesures périodiques sont utiles pour observer une instabilité et comprendre en même temps le processus à l'œuvre. L'évolution des glissements est souvent suivie de cette manière si le délai nécessaire pour prendre d'autres mesures (p. ex. évacuation) est jugé suffisant. Le temps de réaction (ou d'intervention) lié aux processus brutaux et rapides est court, si bien que les instabilités de ce type seront surveillées au moyen d'un système d'alarme fonctionnant en continu.

C'est ainsi qu'on distingue quatre niveaux de surveillance en fonction de l'objectif poursuivi. La mise en place d'un système d'alerte ou d'alarme implique de comprendre préalablement les processus dangereux, c'est pourquoi il faut impérativement commencer par évaluer les dangers. Puis on décide s'il y a lieu de passer aux niveaux 2, 3 ou 4. Le nombre de mesures à effectuer croît d'un niveau à l'autre:

Tab. 3 > Niveaux de surveillance

Niveau	But, type	Fréquence des relevés
1.	Meilleure compréhension du processus, évaluation du danger	Un ou plusieurs
2.	Suivi ou surveillance de l'évolution du processus	Périodiques*
3.	Détection précoce, système d'alerte **	Périodiques*, fréquents
4.	Surveillance permanente, systèmes d'alarme **	Continus***

* Intervalles possibles entre les mesures périodiques: jours, mois, année(s). Ils peuvent être réguliers ou irréguliers. Dans certaines circonstances (suite à des précipitations ou à des intempéries, etc.), un intervalle fixé peut être raccourci.

** Les **systèmes de préalerte** comprennent des systèmes d'alerte et d'alarme («Early Warning Systems» en anglais). Ils sont intégrés dans une stratégie de sécurité.

*** Surveillance continue avec transmission des données en temps réel afin de diffuser l'alarme (systèmes d'alarme). La surveillance continue avec transmission rapide des données (en temps réel) est notamment indiquée lorsqu'une rupture spontanée est à craindre. Elle permet en principe de surveiller le processus initial («first move», p. ex. éboulement) et le processus secondaire («second move», p. ex. lave torrentielle).

Une fois le niveau de surveillance défini, on établit une stratégie tenant compte des possibilités de faire des mesures en surface et dans le sous-sol. Les quatre niveaux peuvent être planifiés et réalisés l'un après l'autre. Les paramètres suivants sont susceptibles d'être intégrés dans une stratégie de surveillance:

- > déplacements, déformations: les produits tels que vitesses, accélérations et mouvements différentiels sont calculés à partir des déplacements mesurés;
- > paramètres météorologiques (précipitations, température, etc.);
- > paramètres hydrauliques (pression hydraulique, niveau d'eau, vitesse d'écoulement, etc.);
- > valeurs géophysiques (microsismiques, acoustiques, etc.);
- > autres caractéristiques des matériaux ou des processus dangereux.

Le choix des méthodes et des techniques de mesure revêt une grande importance. Il faut examiner si celles qu'on envisage se prêtent à la surveillance fiable, précise, continue, durable d'une surface ou d'une ligne. Leurs avantages et leurs inconvénients doivent être évalués préalablement en fonction de leur pertinence et de leur durabilité. Les méthodes appliquées pour surveiller les mouvements de terrain sont subdivisées en trois types selon la configuration des mesures:

a) Mesures ponctuelles:

Exemples: extensomètre mesurant l'ouverture d'une fissure, GPS.

b) Mesures linéaires (le long d'une ligne ou d'un profil):

Les mesures linéaires peuvent être effectuées le long d'une ligne située en surface ou le long d'un profil souterrain, tel que trou de forage. Les mesures dans un trou de forage sont très importantes, car elles permettent de mesurer des modifications ou

des déformations du sous-sol avec une bonne fiabilité. Exemple: inclinomètre placé dans un trou de forage.

c) Mesures couvrant l'ensemble d'un territoire:

L'avantage des mesures couvrant l'ensemble d'un territoire est leur résolution spatiale (c'est-à-dire leur grande couverture). Cette caractéristique est très importante dans les régions où l'extension et l'activité des instabilités est inconnue. Exemples: LIDAR, INSAR, photos (les trois peuvent être appliqués à partir d'un satellite, d'un aéronef ou du sol).

La combinaison de plusieurs méthodes peut s'avérer judicieuse lorsqu'il est utile d'avoir des informations ponctuelles, linéaires et surfaciques. Elle est aussi nécessaire quand il s'agit d'effectuer des analyses spatialement distinctes ou si la surveillance doit satisfaire à des exigences élevées (p. ex. redondance nécessaire).

Précision des mesures

La précision exigée doit être fixée au préalable. Cela implique de connaître les spécificités techniques des appareils de mesure et les caractéristiques du système de surveillance. La précision des mesures de déplacement sera submillimétrique à décimétrique. En général, le danger d'éboulement requiert une précision de l'ordre du millimètre. La précision des appareils de mesure doit être vérifiée (étalonnage).

Un dispositif de surveillance venant d'être installé est d'abord observé afin d'appréhender le fonctionnement du système, la variabilité des mesures, les fluctuations naturelles et leur influence (phase dite «d'étalonnage»). Ensuite seulement, on pourra en tirer des interprétations touchant à la sécurité et fixer des seuils. Les questions suivantes sont traitées lors de l'analyse et de l'interprétation des données:

- > Quelle est l'évolution des déplacements? Quelle est leur dynamique? Quelle est la nature des mouvements? Y a-t-il des accélérations et des tendances?
- > Y a-t-il des influences externes importantes, telles que précipitations ou température?
- > Y a-t-il des indices de mécanismes de rupture?

L'interprétation des données ainsi acquises et de la dynamique des mouvements de terrain fonde l'évaluation des dangers. Elle permet de vérifier les scénarios et le système de préalerte.

La stratégie de surveillance est réexaminée lorsque les risques changent ou que des incertitudes excessives subsistent. On vérifie alors la fiabilité des données acquises, des valeurs limites et du système lui-même. Cette opération comprend une étude statistique des données assortie d'analyses d'erreur (écart type, etc.).

La fiabilité des systèmes de préalerte est subdivisée en trois volets:

1. fiabilité technique (appareils, composants, configuration du système);
2. fiabilité des données fondant les alertes aux dangers naturels (pertinence);
3. fiabilité des personnes (experts, préposés à la sécurité, etc.).

Analyse et interprétation
des données

Fiabilité des systèmes
de préalerte

La fiabilité des personnes importe surtout lorsqu'un système d'alerte implique une décision humaine d'intervenir. Elle concerne la qualité des interprétations et la compétence des experts en cas d'événement. Leur propension à tolérer plus ou moins de risques influence la sécurité. En cas d'événement, on compte aussi sur d'autres personnes appelées à prendre des décisions (responsables de la sécurité, organes de conduite communaux, etc.).

Lorsqu'on évalue un système de surveillance ou les données qu'il livre, on doit se demander si le nombre de points de mesure et le nombre de paramètres considérés est approprié. Cet examen peut révéler qu'il manque des points essentiels alors que d'autres peu significatifs sont relevés. On vérifiera aussi la fréquence des mesures.

Les systèmes de préalerte doivent être aptes au service et disponibles à tout moment. On veillera à ce qu'ils aient une longévité suffisante. Leur fiabilité sera vérifiée régulièrement durant la phase d'exploitation: fiabilité du système lui-même (fonctionnement des appareils de mesure, transmission et sauvegarde des données, alimentation de secours, etc.), effets des dangers naturels (impacts de pierres, de foudre, etc.), effets d'une activité humaine ou animale (détérioration, etc.). Les systèmes de surveillance dont on exige une grande fiabilité doivent être redondants.

L'alerte ou l'alarme est liée à un phénomène évolutif, ici à un processus dangereux. Elle est notamment transmise en cas de danger de crue, d'avalanche ou d'éboulement. Ces processus ont un aspect spatial et un aspect temporel. Ils sont associés à un périmètre donné, par exemple d'échelle locale, régionale, nationale ou internationale. Ils diffèrent aussi largement par leur évolution temporelle. Lorsqu'un éboulement est imminent, le délai de réaction se compte en secondes ou en minutes. Il est de plusieurs minutes quand une lave torrentielle se déclenche dans un terrain meuble périglaciaire instable. En cas de crue menaçant une ville comme Berne, Bâle ou Budapest, il reste davantage de temps pour transmettre l'alerte (quelques heures ou quelques jours).

Alerte

Il incombe aux autorités locales de transmettre l'alarme à l'échelon local. Dans les régions notoirement menacées, l'alerte et l'alarme sont confiées à des équipes spécialement formées. Elles tirent leurs informations de leurs propres systèmes de surveillance et d'institutions nationales. Les valeurs limites des mouvements de terrain sont fixées de cas en cas. De l'ordre du millimètre ou du centimètre lors d'un éboulement imminent, elles sont généralement plus élevées dans le cas de glissements en terrain meuble.

Le concept de sécurité est utile à l'autorité ou à l'institution qui se prépare à un événement naturel. Il règle notamment les compétences en matière d'alerte et d'alarme. Les personnes et les institutions susceptibles d'être impliquées sont les suivantes:

- > spécialiste en dangers naturels,
- > préposé à la sécurité, service de sécurité, conseiller en dangers naturels¹,
- > commission des dangers naturels, commission ou service en charge de l'alerte¹,
- > état-major communal de conduite, conseil exécutif communal,
- > unités d'intervention de la protection de la population (police, sapeurs-pompiers, santé publique, protection civile, services techniques),

¹ échelons / unités possibles: commune, canton, exploitation

- > service cantonal spécialisé, état-major cantonal de conduite,
- > service fédéral spécialisé, tiers.

L'efficacité de ces mesures de protection dépend aussi des réactions des personnes menacées. Elles doivent être en mesure de recevoir et de comprendre les alarmes, puis il faut qu'elles se comportent de manière adéquate en cas de danger imminent. Exemples: respecter les feux rouges, quitter le périmètre menacé lorsque la sirène retentit, gagner un abri (voir aussi le paragraphe consacré à la planification des mesures d'urgence).

Les valeurs limites appliquées aux systèmes de préalerte auront été fixées préalablement par des experts en fonction du site concerné. La procédure de levée des alarmes doit aussi être spécifiée (valeur limite, contrôles, compétences, etc.). Le tableau suivant expose à titre d'exemple trois valeurs limites ou seuils, de même que les compétences qui leur sont associées:

Tab. 4 > Exemples de valeurs limites et seuils

Valeur limite	Vitesse v [mm/jour]	Personnes, compétences
P. ex. valeur limite 1:	v > 1 mm/jour si déplacement global > 3 mm	→ spécialiste, etc.
P. ex. valeur limite 2:	v > 3 mm/jour	→ + commission des dangers naturels
P. ex. valeur limite 3:	v > 8 mm/jour ou déplacement global > 10 mm	→ + état-major de conduite, etc.

Remarque: le nombre de valeurs limites fixées peut être supérieur ou inférieur à trois.

Informations complémentaires

Les services spécialisés de la Confédération sont compétents en ce qui concerne l'alerte à l'échelon national (voir à ce sujet l'ordonnance fédérale sur l'alerte et l'alarme, OAL, et l'arrêté du Conseil fédéral concernant l'optimisation de l'alerte et de la transmission de l'alarme, OWARNA). Ils utilisent la Plate-forme commune d'information sur les dangers naturels (GIN) pour fournir conjointement aux spécialistes en la matière leurs produits concernant les différents dangers naturels. Ces produits comprennent des données mesurées, des prévisions, des avis d'alerte et des bulletins.

4.10.2 Planification des mesures d'urgence

Les plans de mesures d'urgence fixent les mesures qui devront être mises en œuvre par les autorités compétentes et les unités d'intervention en cas d'événement (selon art. 15, al. 1, let. c, OFo). Elles sont principalement destinées à sauver des personnes, et des animaux de rente le cas échéant, à diminuer l'ampleur des dommages et à limiter les dommages consécutifs causés par des substances dangereuses comme les produits chimiques.

Il est essentiel que les autorités compétentes connaissent les dangers dus aux mouvements de terrain et les niveaux d'alerte et d'alarme correspondants (voir points précédents). Les conséquences des événements dangereux sont au moins atténuées grâce aux plans d'évacuation et d'intervention et à leur préparation. En sus des préparatifs logistiques, on prévoira des refuges sûrs pour abriter les personnes évacuées.

Pour en savoir plus

- > *Sättele M., Bründl M., 2015: Guide pratique pour l'utilisation de systèmes de préalerte dans le domaine des dangers naturels gravitationnels*
- > *Plate-forme GIN (site à accès limité): www.gin.admin.ch*
- > *OWARNA: www.planat.ch/fr/behoerden/im-ereignisfall/owarna*
- > *Alertes aux dangers naturels de la Confédération: www.dangers-naturels.ch*

4.11 Vérification périodique et contrôle d'efficacité

Le contrôle d'efficacité indique, d'une part, si des mesures données ont atteint leur objectif (ou non). Il incombe aux autorités de vérifier le concept de protection mis en œuvre et les documents de base sur les dangers. Ce réexamen semble nécessaire en particulier après des intempéries. Le contrôle d'efficacité fournit, d'autre part, des indications sur les points pouvant être adaptés ou optimisés à l'avenir. Il ne constitue donc pas un but en soi, mais il fait partie intégrante des projets. Il révèle également si les montants engagés ont été utilisés à bon escient, conformément aux objectifs visés.

La vérification du concept de protection concerne aussi l'entretien. Toutes les mesures doivent rester opérationnelles, non seulement les ouvrages construits, mais aussi les mesures d'aménagement du territoire et d'organisation.

> Annexe

A1 Bases légales

La présente aide à l'exécution concernant la protection contre les dangers dus aux mouvements de terrain se fonde sur diverses lois fédérales et leurs ordonnances. Les principales prescriptions qui concernent les dangers naturels sont énumérées ci-après:

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

Art. 6: Études de base

² En vue d'établir leurs plans directeurs, les cantons élaborent des études de base dans lesquelles ils désignent les parties du territoire qui:

c) sont gravement menacées par des forces naturelles ou par des nuisances.

Art. 15: Zones à bâtir

⁴ De nouveaux terrains peuvent être classés en zone à bâtir si les conditions suivantes sont réunies:

a) ils sont propres à la construction.

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

Art. 1: But

¹ La présente loi a pour but:

a) d'assurer la conservation des forêts dans leur étendue et leur répartition géographique;

b) de protéger les forêts en tant que milieu naturel;

c) de garantir que les forêts puissent remplir leurs fonctions, notamment leurs fonctions protectrice, sociale et économique (fonctions de la forêt);

d) de maintenir et promouvoir l'économie forestière.

² Elle 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 terrain, d'érosion et de chutes de pierres et veiller à l'endiguement forestier des torrents. Des méthodes aussi respectueuses que possible de la nature doivent être utilisées.

Art. 36: Protection contre les catastrophes naturelles

¹ La Confédération alloue aux cantons, sur la base de conventions-programmes, des indemnités globales pour les mesures destinées à protéger la population et les biens d'une valeur notable contre les catastrophes naturelles, notamment:

- a) la construction, la remise en état et le remplacement d'ouvrages et d'installations de protection;
- c) l'établissement de cadastres et de cartes des dangers, l'aménagement et l'exploitation de stations de mesures ainsi que la mise sur pied de services d'alerte, pour assurer la sécurité des agglomérations et des voies de communication.

Ordonnance du 30 novembre 1992 sur les forêts (OFo, RS 921.01)**Art. 15: Documents de base**

¹ Les cantons établissent les documents de base pour la protection contre les catastrophes naturelles. Ils:

- a) dressent des inventaires répertoriant les ouvrages et les installations importants pour la protection contre les catastrophes naturelles (cadastre des ouvrages de protection);
- b) documentent les sinistres (cadastre des événements) et analysent en cas de besoin les sinistres d'une certaine gravité;
- c) élaborent des cartes des dangers et des plans d'urgence en cas de sinistre et les tiennent à jour.

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 tiennent 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.

⁴ Sur demande, ils mettent les documents de base à la disposition de l'OFEV et les rendent accessibles au public sous une forme adaptée.

Art. 16: Services d'alerte

¹ Dans les endroits où la protection de la population et de valeurs matérielles considérables l'exige, les cantons instituent des services d'alerte. Ils pourvoient à l'aménagement et à l'exploitation des stations de mesure et des systèmes d'information nécessaires.

² Lors de la mise sur pied et de l'exploitation des services d'alerte, les cantons tiennent compte des travaux exécutés par les services spécialisés de la Confédération et de ses directives techniques.

³ Ils veillent à ce que les données des stations de mesure et des systèmes d'information soient mises à la disposition de l'OFEV si celui-ci en fait la demande et soient rendues accessibles au public sous une forme adaptée.

Art. 17: Sécurité des territoires dangereux

¹ La sécurité des territoires dangereux comprend:

- a) des mesures sylvicoles;
- b) des constructions pour empêcher les dégâts d'avalanches et exceptionnellement l'aménagement d'installations pour le déclenchement préventif d'avalanches;
- c) des mesures concomitantes dans le lit des torrents, liées à la conservation des forêts (endiguement forestier);
- d) des travaux contre les glissements de terrain et le ravinement, les drainages nécessaires et la protection contre l'érosion;
- e) des travaux de défense et ouvrages de réception contre les chutes de pierres et de rochers, ainsi qu'à titre exceptionnel le minage préventif de matériaux risquant de tomber;
- f) le transfert, dans des endroits sûrs, de constructions et d'installations menacées.

² Les travaux doivent être combinés, dans la mesure du possible, avec des mesures d'ingénierie biologiques et sylvicoles.

³ Les cantons veillent à une planification intégrale; celle-ci tiendra compte en particulier des intérêts de la gestion forestière, de la protection de la nature et du paysage, de la construction hydraulique, de l'agriculture et de l'aménagement du territoire.

Art. 39: Protection contre les catastrophes naturelles

¹ Les indemnités pour les mesures et l'établissement des documents de base sur les dangers sont en règle générale allouées sous forme globale. Le montant des indemnités globales est négocié entre l'office et le canton concerné et est fonction:

- a) des dangers potentiels et des risques de dommages;
- b) de l'ampleur et de la qualité des mesures ainsi que de leur planification.

² Les indemnités peuvent être allouées au cas par cas lorsque les mesures:

- a) présentent une dimension intercantonale;
- b) touchent des zones protégées ou des objets inscrits dans des inventaires fédéraux;
- c) requièrent dans une mesure particulière une évaluation complexe ou spécifique par des experts en raison des variantes possibles ou pour d'autres motifs; ou
- d) n'étaient pas prévisibles.

³ La contribution au financement des mesures visées à l'al. 2 est comprise entre 35 et 45 % des coûts et est fonction:

- a) des dangers potentiels et des risques de dommages;
- b) du degré de prise en compte effective des risques;
- c) de l'ampleur et de la qualité des mesures ainsi que de leur planification.

⁴ Si un canton assume des charges considérables en raison de mesures de protection extraordinaires, notamment à la suite de dommages dus à des intempéries, la contribution visée à l'al. 3 pourra être exceptionnellement relevée à 65 % au plus du coût des mesures.

⁵ Aucune indemnité n'est allouée pour:

- a) des mesures visant à protéger des bâtiments et des installations qui ont été construits:
1. dans des zones alors déjà définies comme dangereuses ou réputées dangereuses, et
 2. sans être alors liés impérativement à cet emplacement;
- b) des mesures visant à protéger des bâtiments et des installations touristiques telles que téléphériques, remontées mécaniques, pistes de ski ou sentiers pédestres qui se trouvent en dehors des zones habitées.

Art. 66a: Géoinformation

L'OFEV prescrit les modèles de géodonnées et les modèles de représentation minimaux pour les géodonnées de base visées par la présente ordonnance, lorsqu'il est désigné comme service spécialisé de la Confédération dans l'annexe 1 de l'ordonnance du 21 mai 2008 sur la géoinformation.

Loi fédérale du 21 juin 1991 sur l'aménagement des cours d'eau (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.

³ Les mesures doivent être appréciées compte tenu de celles qui sont prises dans d'autres domaines, globalement et dans leur interaction.

Art. 6: Indemnités afférentes aux mesures de protection contre les crues

¹ Dans les limites des crédits alloués, la Confédération encourage les mesures visant à protéger la population et les valeurs matérielles considérables contre les risques inhérents à l'eau.

² Elle accorde des indemnités notamment pour:

- b) l'établissement de cadastres et de cartes des dangers, l'aménagement et l'exploitation de stations de mesures ainsi que la mise sur pied de services d'alerte, pour assurer la sécurité des agglomérations et des voies de communication.

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

Art. 20: Directives

L'OFEV édicte des directives, notamment sur:

- b) l'établissement de cadastres et de cartes des dangers.

Art. 21: Zones dangereuses et espaces pour les cours d'eau

¹ Les cantons désignent les zones dangereuses.

³ Ils tiennent compte des zones dangereuses [...] 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 œuvre pour se protéger des crues.

Art. 27: Études de base effectuées par les cantons

¹ Les cantons établissent les documents de base pour la protection contre les dangers naturels. Ils:

- a) dressent des inventaires répertoriant les ouvrages et les installations importants pour la sécurité en cas de crues (cadastre des ouvrages de protection);
- b) documentent les sinistres (cadastre des événements) et analysent en cas de besoin les sinistres d'une certaine gravité;
- c) élaborent des cartes des dangers et des plans d'urgence en cas de sinistre et les tiennent à jour;
- d) effectuent un relevé de l'état des eaux et de leur modification;
- f) aménagent les stations de mesure requises dans l'intérêt de la protection contre les crues et en assurent l'exploitation.

² Ils tiennent compte des directives techniques et des travaux réalisés par la Confédération.

³ Sur demande, ils mettent les données recueillies à la disposition de l'OFEV et les rendent accessibles au public sous une forme adaptée

Loi fédérale du 1^{er} octobre 2010 sur les ouvrages d'accumulation (LOA, RS 721.101)

Art. 2: Champ d'application

¹ La présente loi s'applique aux ouvrages d'accumulation qui remplissent l'une des conditions suivantes:

- a) la hauteur de retenue au-dessus du niveau d'étiage du cours d'eau ou du niveau du talweg (hauteur de retenue) est de 10 m au moins;
- b) la hauteur de retenue est de 5 m au moins et le volume de retenue est supérieur à 50000 m³.

² L'autorité fédérale de surveillance (art. 22) a les compétences suivantes:

- a) assujettir à la présente loi les ouvrages d'accumulation de dimensions plus modestes présentant un risque potentiel particulier;
- b) exclure du champ d'application de la présente loi les ouvrages d'accumulation pour lesquels il est prouvé qu'ils ne présentent pas de risque potentiel particulier.

Art. 3: Définitions

¹ Sont considérés comme des ouvrages d'accumulation les aménagements destinés à relever un plan d'eau ou à accumuler de l'eau ou des boues. Sont également considérés

comme tels les ouvrages destinés à retenir des matériaux charriés, ainsi que de la glace et de la neige, ou à retenir brièvement de l'eau (bassins de rétention).

Art. 10: Dispositions pour les cas d'urgence

¹ L'exploitant prend des dispositions pour le cas où la sûreté de l'exploitation de l'ouvrage d'accumulation ne serait plus garantie du fait d'une anomalie, d'un événement naturel ou d'un acte de sabotage.

² En cas d'urgence, il est tenu de prendre toutes les mesures évitant de mettre en danger les personnes, les biens et l'environnement.

Art. 12: Protection de la population en cas d'urgence

¹ En cas d'urgence, la Confédération, les cantons et les communes veillent à informer la population sur le comportement qu'elle doit adopter et à l'évacuer si nécessaire; pour ce faire, ils utilisent les moyens et les installations relevant de la protection de la population.

Ordonnance du 17 octobre 2012 sur les ouvrages d'accumulation (OSOA, RS 721.101.1)

Art. 1: Définitions

¹ Un ouvrage d'accumulation se compose des éléments suivants:

- a) l'ouvrage de retenue;
- b) le bassin de retenue qui lui appartient;
- c) les installations annexes.

² Sont réputés ouvrages de retenue:

- a) les murs en béton ou en pierre naturelle;
- b) les barrages en remblai;
- c) les barrages mobiles au fil de l'eau et leurs digues latérales.

Art. 2: Ouvrages d'accumulation présentant un risque potentiel particulier

¹ Un risque potentiel particulier existe lorsque la vie de personnes est mise en danger ou que des dégâts matériels importants peuvent être causés en cas de rupture de l'ouvrage de retenue.

² Les cantons concernés annoncent à l'autorité fédérale de surveillance (Office fédéral de l'énergie, OFEN) les ouvrages d'accumulation qui ne sont pas soumis à la LOA en raison de leurs dimensions, mais qui présentent probablement un risque potentiel particulier.

Art. 3: Ouvrages d'accumulation ne présentant pas de risque potentiel particulier

¹ L'exploitant qui demande l'exclusion de son ouvrage d'accumulation du champ d'application de la LOA doit joindre à sa requête tous les documents nécessaires à la vérification du risque potentiel.

A2 Identification des types de mouvements de terrain

Pour se protéger efficacement contre les mouvements de terrain, il est très important de connaître les processus déterminants. Chaque phénomène a ses caractéristiques propres – cause, mécanisme de rupture, vitesse, dynamique, volume et surface touchée. La compréhension des processus et des mécanismes permet d'évaluer les dangers et de planifier des mesures de protection en connaissance de cause. La carte des dangers, qui fournit des informations sur le danger auquel un secteur est exposé, est nécessaire pour prendre des décisions concernant les mesures à prendre. Les types fondamentaux de mouvements de terrain sont expliqués succinctement dans les paragraphes suivants.

A2-1 Définition des mouvements de terrain

La loi sur les forêts porte sur les avalanches, les glissements de terrain, l'érosion et les chutes de pierres (art. 1, al. 2, LFo). Les dangers d'avalanches ne sont pas abordés dans la présente aide à l'exécution. Elle s'applique par analogie à tous les processus de chute: chute de pierres, chute de blocs, chute de glace, éboulement, écroulement et effondrement.

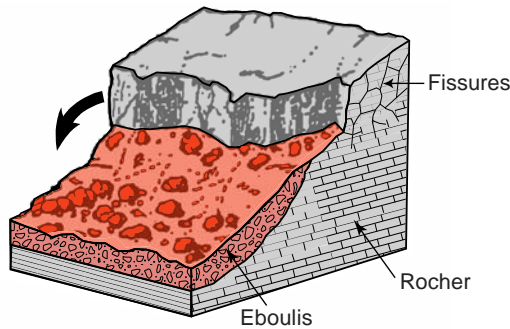
La notion de transition est aussi importante. La même masse est parfois sujette à plusieurs processus consécutifs. Il arrive par exemple, au front raide d'un glissement lent continu (événement primaire, «first move»), qu'un glissement spontané parte sur une surface secondaire et occasionne une coulée de boue (événement secondaire, «second move»). Tous les processus et leur évolution influencent l'évaluation des dangers et doivent donc être pris en compte (Varnes 1978, Turner & Schuster 1996).

A2-2 Processus de chute

Le décrochement de roche ou de terrain meuble dans un terrain raide est nommé processus de chute. La plupart du temps, le matériel tombe en chute libre ou rebondit au sol (fig. 19). Les processus de chute sont des mouvements de terrain rapides qui se subdivisent en quatre catégories d'après leur volume et la grandeur de leurs composantes (tab. 5). La taille et la forme des blocs qui tombent sont essentiellement déterminées par la structure de la roche en place (fissures, etc.). Lorsque les surfaces de rupture sont très actives et touchent des compartiments proches de la surface, les chutes de pierres et les éboulements peuvent être dus à un phénomène de fauchage.

Fig. 19 > Processus de chute

Une partie du déplacement se passe en chute libre. Puis les pierres et les blocs rebondissent et finissent par rouler jusqu'à ce qu'ils s'arrêtent.



modifié d'après Amanti et al. 1992

Tab. 5 > Classification des processus de chute en fonction du diamètre et du volume

Processus	Diamètre des composantes	Volume	Vitesse	Remarques
Chute de pierres	<50 cm	-	<30 m/s	En général, chute de quelques pierres par événement
Chute de blocs	≥50 cm	<100 m ³	<30 m/s	En général, chute de quelques blocs par événement.
Éboulement	-	>100 m ³ et <1 million de m ³	10–40 m/s	Éboulement d'une masse rocheuse; en général, chute d'un grand nombre de blocs qui se fragmentent pendant leur déplacement. Les éboulements peuvent comprendre plusieurs phases (ruptures partielles).
Écroulement	-	>1 million de m ³	>40 m/s	La phase initiale implique une masse compacte. Le périmètre sujet à un écroulement, y compris la zone de dépôt, peut avoir une grande étendue.

A2-3 Processus de glissement (glissements de terrain)

On entend par processus de glissement un mouvement vers l'aval, sur une surface définie, de roche ou de terrain meuble (et de sol). Dans certains cas particuliers, il peut y avoir une série de surfaces de glissement à l'intérieur d'une zone de cisaillement large de plusieurs mètres. Les instabilités naturelles de ce type sont extrêmement courantes en Suisse et elles se manifestent sous toutes sortes de formes. Le dernier glissement de terrain qui a occasionné des dégâts de grande ampleur s'est produit au Falli Hölli, dans le canton de Fribourg, en 1994. Il a détruit 40 maisons et un hôtel en les entraînant dans le Höllbach à une vitesse de six mètres par jour (Raetzo 1997). Les conditions hydrogéologiques influencent l'activité de ce processus. C'est pourquoi on accorde une grande attention au rôle joué par l'eau souterraine et superficielle dans le mécanisme et l'activité des glissements de terrain. Les critères décrits aux paragraphes suivants sont importants pour les comprendre.

A2-3.1 Mécanisme

Un tassement est un mouvement gravitaire de terrain rocheux comprenant une composante verticale prépondérante. La transition entre tassement et glissement de terrain est graduelle et les deux phénomènes ont un mode d'action similaire. C'est pourquoi ils sont évalués avec les mêmes critères. Des mécanismes de chute peuvent se produire comme «second move» à partir d'une masse tassée disloquée et sont alors à traiter selon les critères propres aux processus de chute.

Dans les *glissements rotationnels*, la masse en mouvement glisse vers l'aval, sous l'effet de la gravité, le long d'une surface de rupture concave (fig. 20, à gauche). Ils présentent souvent des cuvettes oblongues et des fissures de traction dans leur partie supérieure. La masse mobilisée est comprimée à son front, où elle forme des bourrelets caractéristiques. Ce type de glissement survient dans un terrain meuble homogène, principalement argileux et limoneux.

Dans les *glissements translationnels*, des couches ou des séries de couches glissent le long d'une zone de faiblesse préexistante sensiblement plane (fig. 20, à droite). Leur superficie est très variable. Elle peut atteindre plusieurs kilomètres carrés, jusqu'à 45 km² pour un cas situé en Suisse. La masse mobilisée a souvent une épaisseur de quelques dizaines de mètres. Les zones de flysch et de schistes marno-calcaires sont particulièrement sujettes à ce genre de mouvement. Sur le terrain, on constate fréquemment des formes combinées de glissements rotationnels et translationnels.

Fig. 20 > Glissement rotationnel (à gauche) et translationnel (à droite)

Les glissements rotationnels sont caractérisés par une surface de glissement circulaire. Les glissements translationnels, qui se déplacent sur une surface sensiblement plane, peuvent atteindre une vitesse maximale de déplacement plus élevée.

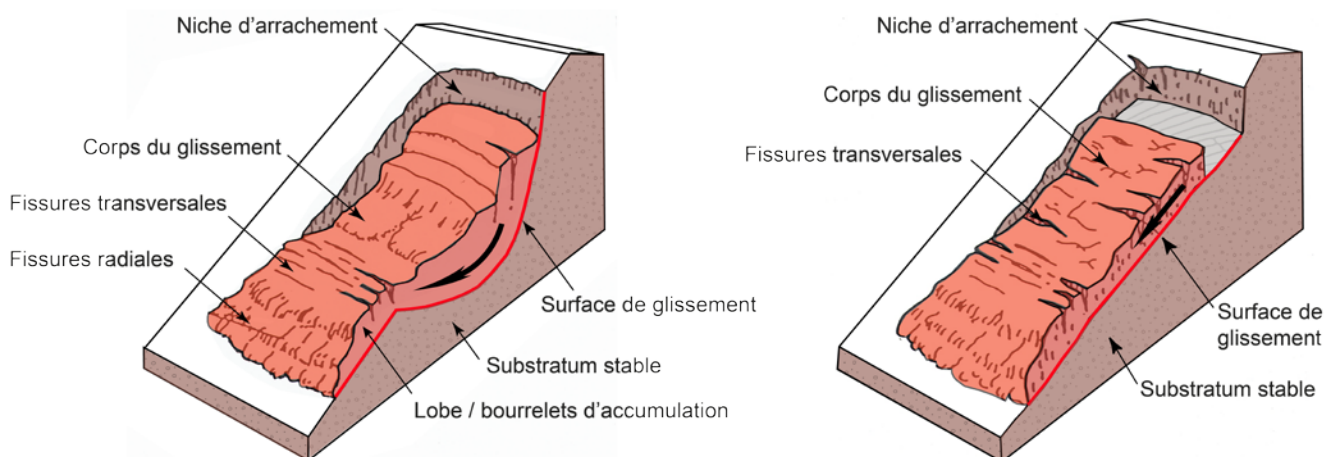


schéma modifié d'après Varnes 1978 et U.S. Geological Survey 2004

Le fluage est un cas particulier de mouvement de terrain qui est assimilé aux processus de glissement dans la présente aide à l'exécution dans un but de simplification. Les mécanismes à l'œuvre ne sont pas toujours identiques ou leur définition varie d'une région à l'autre.

Fluage

Les mouvements de fluage ont la même vitesse en surface que les glissements de terrain, mais ils sont principalement dus à des déformations par cisaillement à l'intérieur de la masse mobilisée (ils sont donc dépourvus de surface de glissement au sens strict). L'ampleur des déformations diminue avec la profondeur.

Les mouvements de fluage se produisent dans des formations meubles et des couches de sol. Les déformations par cisaillement qu'ils impliquent sont dues à la perte de cohésion de matériaux meubles imputable à une sursaturation en eau ou en glace. Le fluage superficiel peut aussi être causé par des cycles de gel-dégel. Dans les Alpes, des surfaces de plusieurs kilomètres carrés sont sujettes au fluage.

Du point de vue géotechnique, le terme «fluage» désigne essentiellement des mouvements peu profonds. Mais on l'applique aussi à certains glissements ou tassements de versants lents et profonds. Le fauchage, qui survient également en l'absence de surface de glissement continue, relève partiellement du fluage. Mais il est particulièrement marqué lorsqu'un système de fissures bien développé favorise l'apparition de mouvements subsuperficiels dans des compartiments rocheux.

A2-3.2 Vitesse de glissement

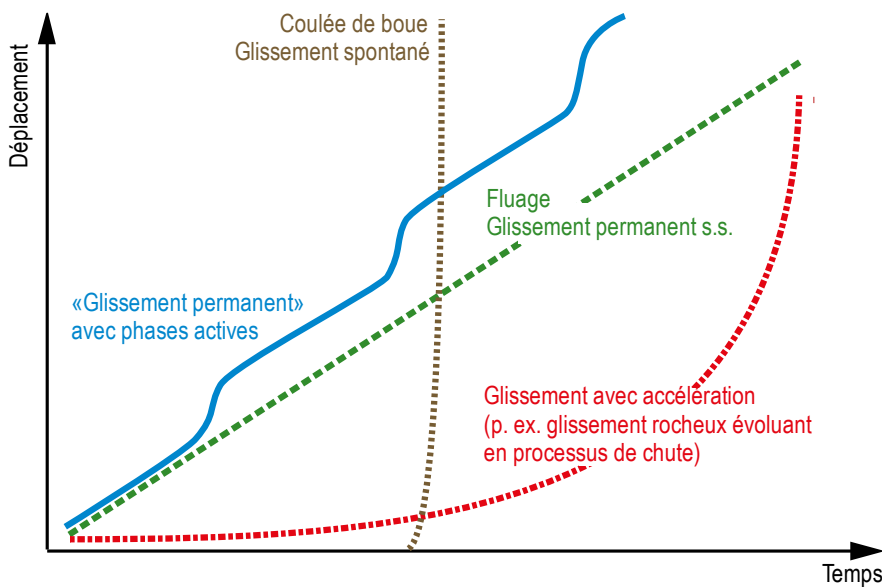
La vitesse d'un glissement actif varie sur le long terme et fluctue constamment (fig. 21). Il est pertinent de considérer la vitesse moyenne pluriannuelle (v) pour évaluer le danger qu'il occasionne. Lorsque les mouvements sont réguliers, le terme «glissement permanent» est recommandé, même si la vitesse varie légèrement en raison des oscillations naturelles de la nappe phréatique, fissurale ou de versant. L'intensité du glissement croît quand il est sujet à des accélérations, jusqu'à atteindre v_{\max} . Dans le cas extrême, une forte accélération peut provoquer le passage à un processus spontané. C'est notamment le cas lorsqu'une coulée de boue émane brusquement d'un glissement de terrain actif. La variation de la vitesse est donc un critère important pour évaluer le danger potentiel (voir le chap. 2 et les § 2.5 ss).

La variation de la vitesse (v_{\max}) peut être assortie d'une probabilité. Celle-ci dépend de plusieurs facteurs, à commencer par les précipitations, les caractéristiques mécaniques de la roche, le niveau de la nappe, la pression interstitielle dans le sol ainsi que le mécanisme, la profondeur et le volume du glissement. Il faut tenir compte de ces facteurs, et d'autres encore, pour évaluer la vitesse v_{\max} . Dans le cas idéal, elle est déterminée à partir de variations mesurées.

Si le déplacement atteint plusieurs décimètres pendant une phase de crise, ou un mètre lors d'un événement, on qualifie généralement l'intensité de forte, car des personnes et des biens sont exposés à une grave menace immédiate. Dans le cas extrême, la vitesse peut croître de zéro à plusieurs mètres par an (v_{\max}). On parle alors de réactivation (voir § 2.9).

Fig. 21 > Relations temps / déplacement pour différents types de glissement

Seule la courbe verte décrit une vitesse permanente au sens strict. Elle varie dans toutes les autres courbes.



modifié d'après Romang, éd. 2008

A2-3.3 Surface de glissement

En général, la profondeur de la surface de glissement a une incidence directe sur la propension à la réactivation et aux mouvements différentiels. Les glissements de terrain superficiels réagissent plus rapidement que les glissements profonds à la modification d'un paramètre (p. ex. propriétés en surface, présence d'une nappe de versant ou interaction avec un cours d'eau). C'est pourquoi des compartiments substables ou apparemment stables peuvent devenir spontanément instables lors d'intempéries. Certains glissements – superficiels en particulier – bougent alors brusquement et peuvent générer des processus d'écoulement rapides.

Les glissements moyens et grands comprennent fréquemment plusieurs surfaces de glissement; toutes les déformations et discontinuités sont déterminantes dans l'évaluation du danger. La dangerosité et les déformations sont souvent générées par des surfaces secondaires qui se trouvent à quelques mètres de profondeur. Lorsqu'on étudie des glissements très profonds, il faut donc tenir compte du fait que la surface de glissement basale peut s'accompagner de plans de glissement secondaires.

La profondeur (p) des glissements de terrain est classée comme suit:

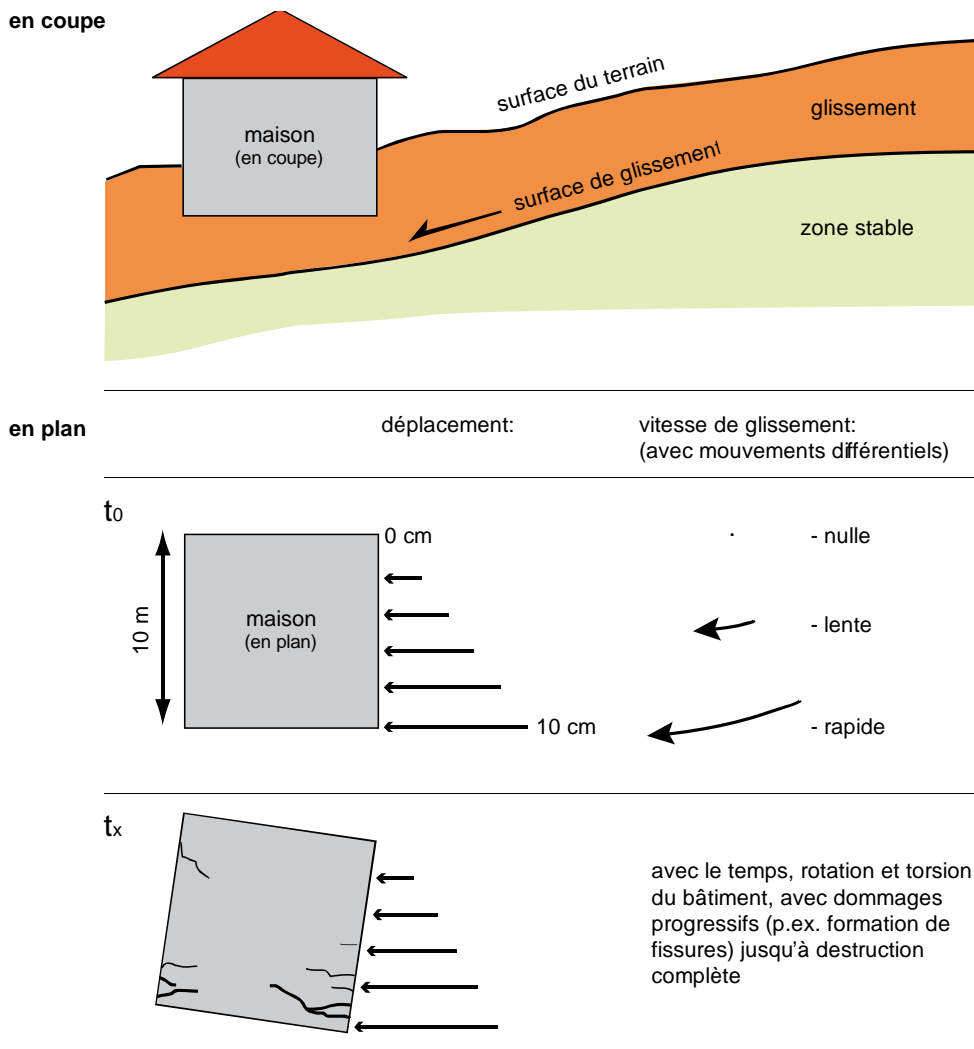
- > 0–2 m: glissement superficiel
- > 2–10 m: glissement semi-profond
- > 10–30 m: glissement profond
- > >30 m: glissement très profond (nouveau)

A2-3.4 Mouvements différentiels

Des forces de cisaillement capables d'endommager des bâtiments et des infrastructures apparaissent au contact entre les compartiments qui se déplacent à des vitesses ou directions différentes (fig. 22).

Fig. 22 > Effets des mouvements différentiels

Torsion et basculement d'un bâtiment, fissuration de la maçonnerie, cisaillement affectant une partie du bâtiment.



Il y a également lieu d'examiner les zones d'extension (fissures de traction) et de compression (bourellets). Tous ces mouvements différentiels (md) peuvent occasionner de gros dégâts, c'est pourquoi ils constituent un critère très important dans l'évaluation des dangers. Les mouvements différentiels doivent être pris en compte dans l'établissement des cartes des dangers (voir chap. 2).

A2-4 Processus d'écoulement (coulée de boue)

La catégorie des processus d'écoulement englobe:

- > les coulées de boue, mélanges de terre, de pierres et d'eau qui s'épandent en pleine pente;
- > les laves torrentielles, mélanges de terre, de pierres et d'eau qui s'écoulent dans un chenal préexistant

Les laves torrentielles – et les méthodes appliquées pour évaluer le danger qu'elles génèrent – ne sont pas examinées dans la présente aide à l'exécution, car ce processus est déjà traité dans les recommandations relatives aux dangers dus aux crues (OFEE et al. 1997 et OFEG 2001).

Les mouvements superficiels qui n'impliquent aucun plan de cisaillement, ou alors seulement dans leur phase initiale, sont considérés comme des processus d'écoulement. La distribution des vitesses dans la masse mobilisée est celle d'un écoulement visqueux. Les précipitations abondantes et les apports d'eau souterraine jouent un rôle crucial dans le déclenchement de ces processus.

Fig. 23 > Processus d'écoulement: coulée de boue

Lorsqu'un écoulement n'emprunte aucun chenal mais descend en pleine pente, on le qualifie généralement de coulée de boue. Le même processus qui emprunte un chenal est nommé lave torrentielle.

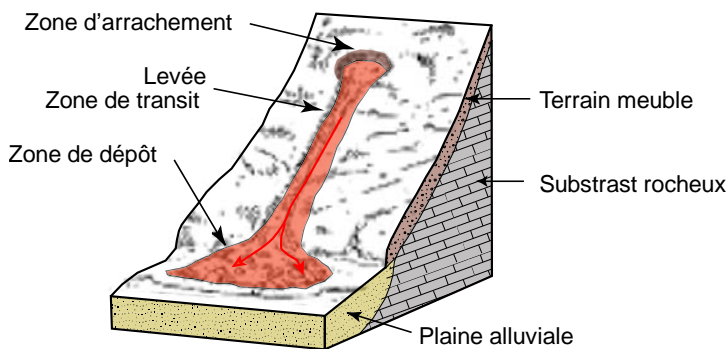


schéma modifié d'après Amanti et al. 1992

Les coulées de boue sont caractérisées par l'écoulement d'une masse visqueuse formée d'un mélange de terrain meuble et d'eau. Elles sont plus lentes sur leurs bords, ce qui provoque parfois la formation de petites crêtes latérales dites «levées». Au pied de la pente, les coulées de boue ralentissent et s'étalent en forme de langue avant de s'arrêter. Ce sont essentiellement les fortes teneurs en eau qui engendrent des vitesses élevées, souvent génératrices d'importants dommages. Les pentes raides dont la couverture quaternaire (moraine argileuse ou limon de pente) est nettement moins perméable que le soubassement sont particulièrement sujettes à ce genre d'instabilité. De tels contrastes de perméabilité entre les différentes couches favorisent l'établissement de pres-

sions hydrauliques élevées, fréquemment à l'origine de glissements évoluant en coulées de boue.

L'intensité d'une coulée de boue est évaluée en fonction de l'épaisseur de la couche mobilisable et de la hauteur de son dépôt.

A2-5 **Mouvements dans le pergélisol**

Le pergélisol est un terrain gelé ($T \leq 0^\circ\text{C}$) toute l'année. Cela signifie que de la glace se forme dans ses pores et dans ses fissures, si bien qu'il est sensiblement imperméable à l'eau liquide. Dans les Alpes, on suppose qu'il occupe de vastes surfaces à une altitude supérieure à 2500 à 3000 mètres selon l'exposition. La couche superficielle qui surmonte le pergélisol, nommée couche active, dégèle à la saison chaude en ayant souvent une teneur élevée en eau.

Diverses formes de fluage peuvent se produire dans les zones de pergélisol (p.ex. glaciers rocheux). Les mouvements de fluage subsuperficiels d'ampleur métrique (solifluxion) sont également favorisés par la présence d'un niveau gelé en permanence, car la couche active est souvent saturée en eau à cause de l'imperméabilité du pergélisol sous-jacent.

Le fluage, comme d'autres mouvements de terrain qui surviennent à une altitude élevée, est sensible aux variations de température: la viscosité et la résistance à la rupture de la glace sont étroitement liées à sa température, alors que l'extension du pergélisol répond avec un certain décalage à l'évolution des températures de surface. L'accélération des glaciers rocheux et des glissements de terrain, la recrudescence des laves torrentielles et la déstabilisation de compartiments rocheux figurent parmi les conséquences possibles d'une hausse de la température.

A2-6 **Processus d'effondrement et d'affaissement**

Les régions karstiques comprennent souvent des dolines. Le lessivage d'une roche soluble (calcaire, dolomie, gypse ou encore cornieule), l'érosion et la présence de cavités souterraines préexistantes sont susceptibles de générer un effondrement ou un affaissement. Les roches gypseuses sont relativement vite lessivées si de l'eau est disponible en suffisance. Mais ces phénomènes karstiques sont aussi capables de former petit à petit des cavités problématiques dans le calcaire et dans la dolomie. Leur rupture – dont le moment est difficile à prévoir – peut provoquer un effondrement soudain («sudden collapse»). Ces roches solubles sont courantes dans le Jura, dans les nappes calcaires helvétiques et dans les Préalpes. Les failles et les plissements accroissent leur tendance à l'instabilité.

A3 Détermination de la probabilité d'occurrence des processus d'écoulement

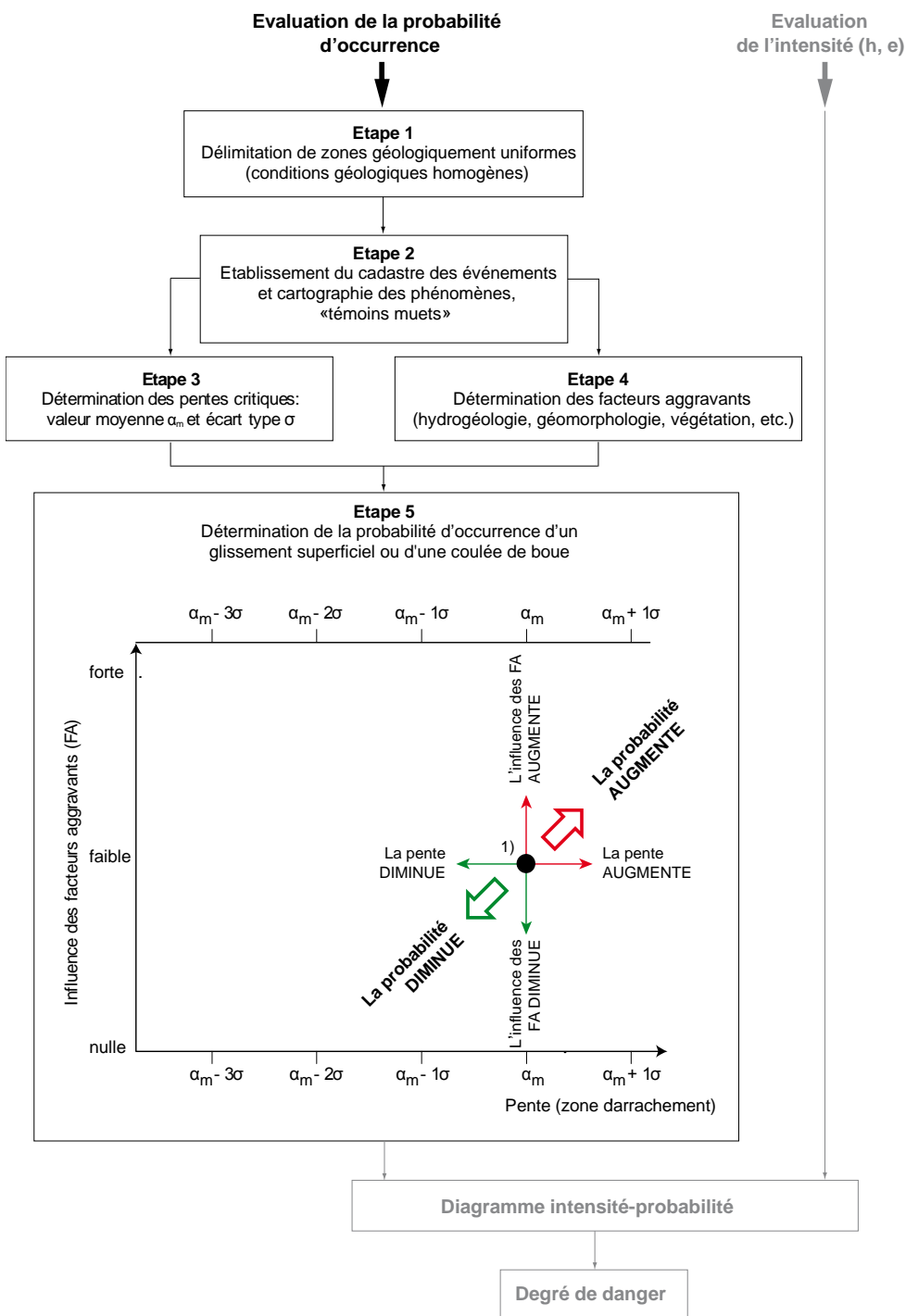
L'annexe 3 complète les critères d'évaluation de la probabilité d'occurrence des processus de glissement et d'écoulement introduits aux § 2.8.2 et 2.8.3. Deux méthodes permettant de déterminer cette probabilité sont exposées ici: celle du diagramme de probabilité et celle de l'organigramme.

A3-1 Détermination à l'aide du diagramme de probabilité

Cette méthode intègre la déclivité moyenne tirée de l'analyse statistique (étape 3, fig. 24) et l'influence des facteurs aggravants (étape 4). Dans les pentes de déclivité largement en-deçà des valeurs critiques, on assigne une probabilité d'occurrence inférieure à 0,003 en l'absence de facteurs aggravants; on considère alors que le danger est de niveau résiduel.

Fig. 24 > Détermination de la probabilité d'occurrence d'une coulée de boue

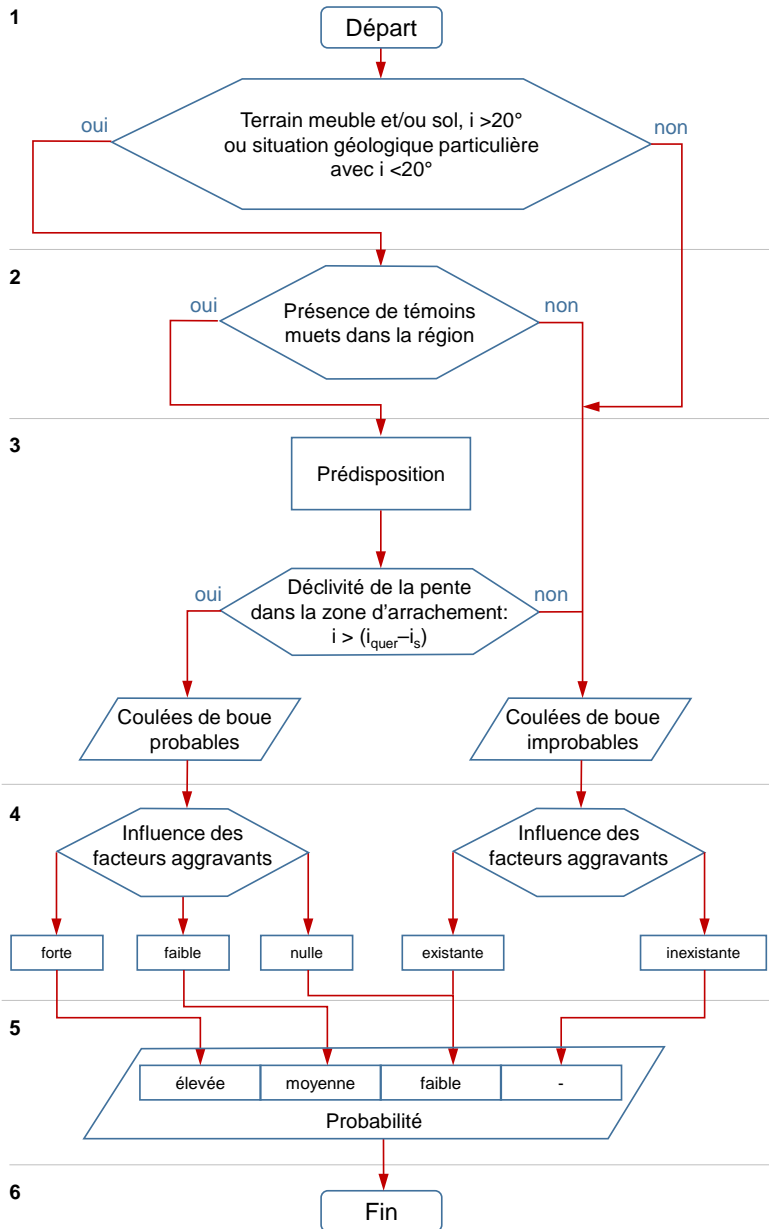
Etapes de la procédure et diagramme de probabilité. La position du point 1) dans le graphique de l'étape 5 correspond par exemple à une probabilité moyenne. Ce point de référence se trouve sur la pente moyenne (déclivité moyenne des événements analysés) et considère que les facteurs aggravants ont une faible incidence. Pour déterminer le degré de danger, il faut également évaluer l'intensité, en plus de la probabilité d'occurrence. α_m = pente moyenne; σ = écart type.



A3-2 Détermination à l'aide de l'organigramme

La méthode de l'organigramme se fonde sur une proposition de l'AGN (AGN 2004). Elle a été appliquée dans quelques cantons depuis 2004 pour déterminer la probabilité d'occurrence des coulées de boue. Cette méthode tient compte des facteurs aggravants et de la déclivité critique dans la zone d'arrachement (environ 20° à 28°). La déclivité de la pente est décrite en tenant compte de la déclivité critique moyenne (i_{quer}) sous déduction d'un écart type (i_s).

Fig. 25 > Organigramme de détermination de la probabilité d'occurrence



A4 Transposition des données de base sur les dangers dans l'aménagement du territoire

Tab. 6 > Conséquences des différents degrés de danger sur la détermination des zones et sur l'établissement des règlements des constructions et des zones

Ces mesures doivent être appliquées non seulement par les aménagistes et les autorités cantonales et communales chargées de l'examen des dossiers et de l'octroi des autorisations, mais aussi par les autres protagonistes comme les assurances, les architectes, les ingénieurs, les unités d'intervention, etc., en particulier lorsque les mesures concernées ne relèvent pas de l'aménagement du territoire.

	Zone de danger	Détermination des zones	Règlement des constructions et des zones	Autres mesures – ne relevant pas de l'aménagement du territoire
	Zone d'interdiction Danger élevé (rouge)	<ul style="list-style-type: none"> • Ne définir aucune nouvelle zone à bâtir. • Déclasser ou modifier les zones à bâtir non construites. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ne construire ou agrandir aucun bâtiment ni installation. • Imposer les restrictions d'affectation nécessaires aux bâtiments existants. • Assortir les transformations et les changements d'affectation de conditions visant à diminuer les risques. • Reconstruire les bâtiments détruits seulement dans des cas exceptionnels et en respectant certaines conditions. 	<ul style="list-style-type: none"> • Informer rapidement les propriétaires concernés du danger existant et des mesures qui doivent être prises. • Inscrire au besoin des restrictions d'affectation dans le registre foncier. • Planifier et mettre en œuvre rapidement les mesures de protection nécessaires sur les plans technique et de l'organisation.
	Zone de réglementation Danger moyen (bleu)	<ul style="list-style-type: none"> • Définir de nouvelles zones à bâtir en les assortissant toujours de conditions, après avoir examiné s'il existe des solutions de re-change et procédé à une pesée des intérêts. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ne construire aucun objet sensible. • Subordonner les autorisations de construire à certaines conditions. • Imposer les restrictions d'affectation nécessaire aux bâtiments existants. • Fixer des exigences relatives à l'agencement, à l'affectation, à l'aménagement et éventuellement à l'équipement des bâtiments et des installations. • Édicter des prescriptions détaillées concernant diverses mesures de protection, selon le type de danger et son intensité. • Dans certains cas fondés, interdire la reconstruction à l'identique des bâtiments détruits afin d'améliorer la situation. 	<ul style="list-style-type: none"> • Informer les propriétaires concernés du danger existant.
	Zone de sensibilisation Danger faible (jaune)	<ul style="list-style-type: none"> • Éviter de définir des zones dans lesquelles des installations à fort potentiel de dommages peuvent être construites. • Indiquer la situation de danger. 	<ul style="list-style-type: none"> • Formuler des recommandations relatives aux bâtiments existants. • Selon le risque, envisager des exigences à l'endroit des utilisations sensibles ou des grandes constructions. 	<ul style="list-style-type: none"> • Informer les propriétaires concernés du danger existant. • Conseiller des mesures applicables pour prévenir les dommages, en collaboration avec les assurances. • Imposer des mesures techniques et d'organisation spéciales aux objets sensibles, en les assortissant de réserves imposées par l'assurance.
	Danger résiduel (hachuré jaune/blanc)	<ul style="list-style-type: none"> • Aggrandir les zones à bâtir existantes et en définir de nouvelles d'une manière très restrictive. • Éviter de définir des zones dans lesquelles des installations à fort potentiel de dommages peuvent être construites. • Indiquer la situation de danger. 	<ul style="list-style-type: none"> • Formuler des recommandations relatives aux bâtiments existants. • Selon le risque, envisager des exigences à l'endroit des utilisations sensibles ou des grandes constructions. 	<ul style="list-style-type: none"> • Informer les propriétaires concernés du danger existant. • Conseiller des mesures applicables pour prévenir les dommages, en collaboration avec les assurances. • Imposer des mesures techniques et d'organisation spéciales aux objets sensibles, en les assortissant de réserves imposées par l'assurance.
	Aucun danger (blanc)	<ul style="list-style-type: none"> • Pour être en droit d'affirmer qu'un périmètre donné n'est exposé à aucun danger d'après les méthodes d'évaluation des dangers usuelles à ce moment, il faut avoir examiné tous les sous-processus issus de toutes les sources possibles. 		

Tab. 7 > Conditions et mesures possibles dans le cadre de la procédure d'octroi de permis de construire

Processus	Restrictions d'utilisation et conditions	Mesures de construction appliquées au bâtiment	Abords et accès
Chute de pierres et de blocs	<ul style="list-style-type: none"> • Interdire les pièces habitables (chambres à coucher, salles de séjour, etc.), les balcons et les terrasses dans les parties du bâtiment les plus exposées, afin de diminuer les risques encourus par les personnes; placer les locaux abritant des appareils ou du matériel, les caves, les couloirs de liaison, etc., du côté exposé au danger (occupation de courte durée). 	<ul style="list-style-type: none"> • Implanter judicieusement le bâtiment à l'intérieur de la parcelle. • Agencer le bâtiment et l'adapter au terrain de manière à ce que quelques pièces seulement soient exposées (objectif: abaisser la probabilité d'impacts directs). • Concevoir le sous-sol et le rez-de-chaussée sous la forme de caissons monolithiques rigides en béton armé. • Renforcer les parois extérieures exposées (béton armé ou coffrage avec matériaux amortisseurs). • Aménager des remblais de protection, murs, digues ou étraves. • Éviter les ouvertures dans les parties exposées du bâtiment, notamment pour des fenêtres et des portes, ou leur donner la plus petite taille possible et les renforcer. 	<ul style="list-style-type: none"> • Interdire les accès ainsi que les aires de jeu et de séjour extérieures dans les secteurs les plus exposés.
Glissement profond permanent		<ul style="list-style-type: none"> • Implanter judicieusement le bâtiment à l'intérieur de la parcelle. • Aménager le terrain de manière à ce que les fouilles et les remblais ralentissent le glissement (également pendant la phase de construction). • Opter pour une fondation plate comprenant un radier renforcé; concevoir le sous-sol sous la forme de caissons monolithiques rigides en béton armé; éviter les configurations sensibles (p. ex. en «L» ou en «U»); fonder le bâtiment sur un sol suffisamment portant. • Introduire les conduites dans le bâtiment de manière à ce qu'elles résistent aux allongements et aux déformations. • Collecter et évacuer les eaux superficielles (provenant de toitures, de parkings, etc.) de manière contrôlée; renoncer à l'infiltration des eaux pluviales dans le sous-sol. 	<ul style="list-style-type: none"> • Collecter, capter et dériver l'eau (en surface et en profondeur; voir le point 4.7 pour les mesures envisageables).
Coulée de boue et glissement spontané (superficiel)	<ul style="list-style-type: none"> • Interdire les pièces habitables (chambres à coucher, salles de séjour, etc.), les balcons et les terrasses dans les parties du bâtiment les plus exposées, afin de diminuer les risques encourus par les personnes; placer les locaux abritant des appareils ou du matériel, les caves, les couloirs de liaison, etc., du côté exposé au danger (occupation de courte durée). 	<ul style="list-style-type: none"> • Implanter judicieusement le bâtiment à l'intérieur de la parcelle. • Agencer le bâtiment et l'adapter au terrain de manière à ce que quelques pièces seulement soient exposées (objectif: abaisser la probabilité d'impacts directs). • Concevoir le sous-sol et le rez-de-chaussée sous la forme de caissons monolithiques rigides en béton armé. • Renforcer les parois extérieures exposées (béton armé ou coffrage avec matériaux amortisseurs). • Aménager des remblais de protection, murs, digues ou étraves. • Éviter les ouvertures dans les parties exposées du bâtiment, notamment pour des fenêtres et des portes, ou leur donner la plus petite taille possible et les renforcer; les renforcements peuvent être appliqués temporairement, par exemple pendant une période d'intempéries. • Collecter et évacuer les eaux superficielles (provenant de toitures, de parkings, etc.) de manière contrôlée; renoncer à l'infiltration des eaux pluviales dans le sous-sol. 	<ul style="list-style-type: none"> • Interdire les accès ainsi que les aires de jeu et de séjour extérieures dans les secteurs les plus exposés. • Collecter, capter et dériver l'eau (en surface et en profondeur; voir le point 4.7 pour les mesures envisageables).

Pour en savoir plus





- > *Recommandation «Aménagement du territoire et dangers naturels» (ARE et al. 2005)*
- > *Recommandations «Protection des objets contre les dangers naturels gravitationnels» (Egli 2005)*
- > *Normes SIA 260, 261 et 261/1*

A5 Exemple de matrice des objectifs de protection

Fig. 26 > Exemple de matrice des objectifs de protection destinée à la prévention par la gestion du territoire, comparable à celles en usage dans les cantons

Aide à la lecture: dans les zones d'habitation (catégorie d'objets 3.2), l'objectif est une protection complète pour les événements d'une période de retour inférieure ou égale à 100 ans. Pour les événements d'une période de retour comprise entre 100 et 300 ans, de faibles intensités sont acceptables. Pour les événements encore plus rares, des intensités moyennes sont tolérables.

Légende

	= protection complète	= aucune intensité admissible	= 0
	= protection contre les intensités moyennes et fortes	= intensité faible admissible	= 1
	= protection contre les intensités fortes	= intensité moyenne admissible	= 2
	= pas de protection	= intensité forte admissible	= 3

Catégorie d'objets

Objectifs de protection

Nr.	Biens	Infrastructures	Valeurs naturelles	Période de retour [en années]			
				1-30 fréquent	30-100 rare	100-300 très rare	>300 extrême rare
1		Itinéraires de randonnée en montagne ou à ski (selon cartes du CAS, etc.)	Paysages naturels	3	3	3	3
2.1		Chemins pédestres et pistes de ski de fond commerciaux, chemins agricoles, conduites d'importance communale		2	3	3	3
2.2	Bâtiments inhabités (remises, granges, etc.)	Voies de communication d'importance communale, conduites d'importance cantonale	Forêt protectrice, terrain agricole	2	2	3	3
2.3	Bâtiments et hameaux habités temporairement ou en permanence, étales, bergeries, etc.	Voies de communication d'importance cantonale ou de grande importance communale, conduites d'importance nationale, chemins de fer de montagne, domaines skiables et d'exercices pour le ski.	Forêt protectrice dans la mesure où elle protège des regroupements d'habitations	1	1	2	3
3.1		Voies de communication d'importance nationale ou de grande importance cantonale, téléskis et télésièges		0	1	2	3
3.2	Regroupements d'habitations, terrains affectés à l'industrie et à l'artisanat, zones à bâtir, terrains de camping, installations de sport et de loisirs	Stations des divers moyens de transport		0	0	1	2
3.3	Risques spéciaux, vulnérabilité particulière ou dommages secondaires.	Risques spéciaux, vulnérabilité particulière ou dommages secondaires.		Détermination au cas par cas			

Pour en savoir plus

- > *Recommandation «Aménagement du territoire et dangers naturels» (ARE et al. 2005)*
- > *Brochure «Attention dangers naturels! Responsabilité du canton et des communes en matière de dangers naturels» (Groupe de travail «Dangers naturels» du canton de Berne 2013)*

> Bibliographie

- AGN 2004: Gefahreinstufung Rutschungen i. w. S. Arbeitsgruppe für Naturgefahren AGN. Arbeitsbericht zu Handen des BWG, Bern.
- Amanti M., Castaldo G., Marchionna G., Pecci M. 1992: Proposta di una nuova classificazione dei fenomeni franosi, ai fini del rilevamento geologico-tecnico e della corretta prevenzione del dissesto del territorio. Bollettino del Servizio Geologico d'Italia, vol. CXI: 3–20.
- ARE, OFEG, OFEFP 2005: Recommandation – Aménagement du territoire et dangers naturels. Office fédéral du développement territorial (ARE), Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG), Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP). Série «Dangers naturels», Berne: 48 p.
- Bezzola G.R., Hegg C. (Ed.) 2008: Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 2 – Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahrengrundlagen. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Eidgenössische Forschungsanstalt (WSL). Umwelt-Wissen Nr. 0825, Bern: 429 S.
- BFF, EISLF 1984: Richtlinien zur Berücksichtigung der Lawinengefahr bei raumwirksamen Tätigkeiten. Bundesamt für Forstwesen (BFF), Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung (EISLF), Bern: 35 S.
- Bommer C., Phillips M., Keusen H.-R., Teyssere P. 2010: Construire sur le pergélisol: Guide pratique. Birmensdorf, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL): 126 p.
- Bonzanigo L. 1999: Lo slittamento di Campo Vallemaggia. Thèse ETH Zürich Nr. 13 387.
- Bonzanigo L., Eberhardt E., Loew S. 2007: Long-term investigation of a deep-seated creeping landslide in crystalline rock – Part 1: Geological and hydromechanical factors controlling the Campo Vallemaggia landslide. Canadian Geotechnical Journal 44 (10): 1157–1180.
- Bründl M. (éd.) 2009: Guide du concept de risque (version d'évaluation). Stratégie «Dangers naturels Suisse». Projet A1.1. Plate-forme nationale «Dangers naturels» PLANAT, Berne: 61 p.
- Cruden D.M., Varnes D.J. 1996: Landslide types and processes. In Turner A.K., Schuster R.L. (eds): Landslide investigation and mitigation: 36–75. Transportation Research Board, special report 247. Washington: National Academy Press.
- Eberhardt E., Bonzanigo L., Loew S. 2007: Long-term investigation of a deep-seated creeping landslide in crystalline rock – Part 2: Mitigation measures at Campo Vallemaggia and numerical modeling of deep drainage. Canadian Geotechnical Journal 44(10): 1181–1199.
- Egli Eng. 2011: Die Einwirkung von Hangmuren auf Gebäude – Analyse, Dokumentation und Interpretation von Schadenfällen. Auftrag des Bundesamts für Umwelt (BAFU), Bern (unveröffentlicht). Résumé de l'étude dans Loup et al. 2012: Impact pressures of hillslope debris flows – back-calculation and simulation (RAMMS). Interpraevent Grenoble, Conference Proceedings 1: 225–236.
- Egli T. 2005: Recommandations – Protection des objets contre les dangers naturels gravitationnels. Association des établissements cantonaux d'assurance incendie (AEAI) (éd.): 109 p.
- Frehner M., Wasser B., Schwitler R. 2005: Gestion durable des forêts de protection – Soins sylvicoles et contrôle des résultats: instructions pratiques. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Berne: 30 p., avec annexes.
- Gerber W. 2001 (avec complément 2006): Directive sur l'homologation des filets de protection contre les chutes de pierres. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL). L'environnement pratique, Berne: 39 + 6 p.
- Groupe de travail «Dangers naturels» du canton de Berne 2013: Attention, dangers naturels! Responsabilité du canton et des communes en matière de dangers naturels: 46 p.
- Hübl J., Habersack H., Kienholz H., Agner P., Ganahl E., Moser M., Scheidl C., Kerschbaumsteiner W., Schmid F. 2006: Disaster Information System of Alpine Regions (DIS-ALP): Methodik Teil 1, Appendix 2: Definitions, IAN Report 101, Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Humair F., Pedrazzini A., Epard J.L., Froese C.R., Jaboyedoff M. 2013: Structural characterization of Turtle Mountain anticline (Alberta, Canada) and impact on rock slope failure. Tectonophysics 605: 122–148.
- Hutchinson J.N., Gostelow P.T. 1976: The development of an abandoned cliff in London Clay at Hadleigh, Essex, Phil. Tran. Roy. Soc. A283: 557–604.
- Ingensand H. 2006: Metrological aspects in terrestrial laser-scanning technology. Proceedings of the 3rd IAG / 12th FIG Symposium, Baden, Austria.
- IUGS 1995: A suggested method for describing the rate of movement of a landslide. International Union of Geological Sciences IUGS. Working Group on Landslides, Bulletin of the International Association of Engineering Geology (IAEG) 52: 75–78.
- Loat R., Meier E. 2003: Dictionnaire de la protection contre les crues. Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG) (éd.), Berne: Haupt.
- OFAT, OFEE, OFEFP 1997: Recommandations – Prise en compte des dangers dus aux mouvements de terrain dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire. 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). Série «Dangers naturels», Berne: 42 p.

- OFEE, OFAT, OFEFP 1997: Recommandations – Prise en compte des dangers dus aux crues dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire. Office fédéral de l'économie des eaux (OFEE), Office fédéral de l'aménagement du territoire (OFAT), Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP). Série «Dangers naturels», Berne: 32 p.
- OFEE, OFEFP 1995: Recommandations – Légende modulable pour la cartographie des phénomènes. Office fédéral de l'économie des eaux (OFEE), Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP). Série «Dangers naturels», Berne: 57 p.
- OFEG 2001: Protection contre les crues des cours d'eau. Office fédéral des eaux et de la géologie (OFEG). Directives de l'OFEG, Bienne: 73 p.
- OFEV 2011: Manuel sur les conventions-programmes conclues dans le domaine de l'environnement. Communication de l'OFEV en tant qu'autorité d'exécution. Office fédéral de l'environnement (OFEV). L'environnement pratique n° 1105, Berne: 222 p.
- OFEV 2015: Modèle de géodonnées pour la cartographie des dangers. Office fédéral de l'environnement (OFEV). www.bafu.admin.ch/geodatenmodelle [FR, Dangers naturels].
- OFROU 2008: Directive – Actions de chutes de pierres sur les galeries de protection. Office fédéral des routes (OFROU), Berne: 22 p.
- Parriaux A., Bonnard C., Tacher L. 2010: Glissements de terrain: hydrogéologie et techniques d'assainissement par drainage. Guide pratique. Office fédéral de l'environnement (OFEV). Connaissance de l'environnement n° 1023, Berne: 128 p.
- PLANAT 2013: Niveau de sécurité face aux dangers naturels. Plate-forme nationale «Dangers naturels» PLANAT, Berne: 15 p.
- Raetzo H. 1997: Massenbewegungen im Gurnigelflysch und Einfluss der Klimaänderung. Arbeitsbericht NFP 31. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich: 256 S.
- Raetzo H., Rickli C. 2007: Rutschungen. In: Bezzola G.R., Hegg C. (Ed.) 2007: Ereignisanalyse Hochwasser 2005. Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Eidgenössische Forschungsanstalt (WSL). Umwelt-Wissen Nr. 0707, Bern: 215 S.
- Raetzo H., Wegmüller U., Strozzi T., Marks F., Farina P. 2006: Monitoring of Lumnez landslide with ERS and ENVISAT SAR data, ESA ENVISAT Symposium, Montreux 5 p.
- Reuter F., Klengel K.J., Pasek J. 1992: Ingenieurgeologie. 3. Auflage, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie GmbH, Leipzig – Stuttgart.
- Romang H. (éd.) 2008: Efficacité des mesures de protection. Stratégie «Dangers naturels» Suisse. Projet A 3. Plate-forme nationale «Dangers naturels» PLANAT, Berne: 289 p.
- Rouiller J.D., Jaboyedoff M., Marro C., Philipposian F., Mamin M. 1998: MATTEROCK: une méthodologie d'auscultation des falaises et de détection des éboulements majeurs potentiels. Rapport final PNR 31. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich: 239 p.
- Rovina H., Liniger M., Jordan P., Gruner U., Bollinger D. 2011: Empfehlungen für den Umgang mit Sturzmodellierungen. Swiss Bull. Angew. Geol. 16/1: 57–79.
- Sättele M., Bründl M. 2015: Guide pratique pour l'utilisation de systèmes de préalerte dans le domaine des dangers naturels gravitationnels. Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), Office fédéral de la protection de la population (OFPP), Berne: 64 p.
- Swisstopo 2003: AG25-Instructions rédactionnelles pour la minute: Représentation des formes quaternaires. Office fédéral de topographie swisstopo, Berne.
- Turner A.K., Schuster R.L. (eds) 1996: Landslide investigation and mitigation. Transportation Research Board, special report 247. Washington: National Academy Press.
- U.S. Geological Survey 2004: Landslide types and processes. United States Geological Survey, Fact sheet 2004–3072, <http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/pdf/fs2004-3072.pdf>.
- Varnes D.J. 1978: Slope movement types and processes. In: Schuster R.L., Krizek R.J. (eds): Landslides – Analysis and control. National Research Council, Washington, D.C., Transportation Research Board, Special Report 176: 11–33.
- WP/WLI 1993: Multilingual Landslide Glossary. Bitech, Richmond, British Columbia.

Normes (état au 30.4.2014)

Norme SIA 103. Règlement concernant les prestations et honoraires des ingénieurs civils. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, 2003.

Norme de compréhension SIA 112. Modèle «Étude et conduite de projets». Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, 2014.

Norme SIA 260. Bases pour l'élaboration des projets de structures porteuses. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, 2013.

Norme SIA 261. Actions sur les structures porteuses. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, 2003.

Norme SIA 261/1. Actions sur les structures porteuses – Spécifications complémentaires. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, 2003.

Norme SIA 269. Bases pour la maintenance des structures porteuses. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, 2011.

Norme SIA 269/1. Maintenance des structures porteuses – Actions. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, 2011.

Norme SIA 269/2. Maintenance des structures porteuses – Structures en béton. Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zurich, 2011.

Sites Internet (commuter le cas échéant sur «Français» ou «FR»)

Alertes aux dangers naturels de la Confédération
www.dangers-naturels.ch

Cartes des dangers
www.bafu.admin.ch/dangers-naturels > Informations pour spécialistes: eau, glissements de terrain, processus de chute, avalanches > Situation de danger et utilisation du territoire > Données de base sur les dangers > Cartes des dangers, Cartes d'intensité et cartes indicatives des dangers

EconoMe
www.econome.admin.ch

Géoportail du canton de Berne
www.apps.be.ch/geo

Gestion durable des forêts de protection (NaiS)
www.bafu.admin.ch/dangers-naturels > Informations pour spécialistes: eau, glissements de terrain, processus de chute, avalanches > Gestion des dangers naturels > Mesures > Forêts de protection

Modèles de géodonnées
www.bafu.admin.ch/geodatenmodelle > Dangers naturels

Office fédéral de l'environnement (OFEV)
www.environnement-suisse.ch

OWARNA
www.planat.ch/fr/behoerden/im-ereignisfall/owarna

PLANAT
www.planat.ch

Plate-forme commune d'information sur les dangers naturels (GIN)
www.gin.admin.ch

SilvaProtect-CH
www.bafu.admin.ch/dangers-naturels > Informations pour spécialistes: eau, glissements de terrain, processus de chute, avalanches > Situation de danger et utilisation du territoire > Données de base sur les dangers > SilvaProtect-CH

> Répertoire

Figures

Fig. 1 Procédure de gestion des dangers naturels	12	Fig. 15 Procédure à suivre pour planifier et réaliser des mesures	53
Fig. 2 Cadastre des événements naturels	17	Fig. 16 Énergie de translation liée aux processus de chute et domaines d'application de divers types d'écrans	60
Fig. 3 Filet pare-pierres	18	Fig. 17 Schéma comparatif des principales méthodes d'assainissement hydrogéologiques	63
Fig. 4 Carte des phénomènes	19	Fig. 18 Dimensionnement d'une mesure de protection en tenant compte de la fourchette d'incertitude	66
Fig. 5 Carte indicative des dangers de chute de pierres et de blocs	26	Fig. 19 Processus de chute	80
Fig. 6 Carte des intensités de chutes de pierres et de blocs	27	Fig. 20 Glissement rotationnel et translationnel	81
Fig. 7 Carte des dangers de chute de pierres et de blocs	28	Fig. 21 Relations temps / déplacement pour différents types de glissement	83
Fig. 8 Diagrammes intensité-probabilité appliqués aux glissements permanents et aux mouvements de terrain spontanés	30	Fig. 22 Effets des mouvements différentiels	84
Fig. 9 Étapes de la procédure suivie pour établir la probabilité d'occurrence des coulées de boue	37	Fig. 23 Processus d'écoulement: coulée de boue	85
Fig. 10 Proportion de glissements superficiels par classe de pente dans la zone d'arrachement	38	Fig. 24 Détermination de la probabilité d'occurrence d'une coulée de boue	88
Fig. 11 Critères de détermination de l'intensité	39	Fig. 25 Organigramme de détermination de la probabilité d'occurrence	89
Fig. 12 Répartition de l'intensité pour une probabilité d'occurrence donnée	46	Fig. 26 Exemple de matrice des objectifs de protection destinée à la prévention par la gestion du territoire, comparable à celles en usage dans les cantons	92
Fig. 13 Répartition de la probabilité d'occurrence pour une intensité donnée	46		
Fig. 14 Niveau de sécurité visé, objectif de protection, objectif des mesures et risque avant et après la réalisation des mesures	51		

Tableaux

Tab. 1 Signification des degrés de danger	30
Tab. 2 Relation entre probabilité d'occurrence et période de retour	32
Tab. 3 Niveaux de surveillance	68
Tab. 4 Exemples des valeurs limites et seuils	71
Tab. 5 Classification des processus de chute en fonction du diamètre et du volume	80
Tab. 6 Conséquences des différents degrés de danger sur la détermination des zones et sur l'établissement des règlements des constructions et des zones	90
Tab. 7 Conditions et mesures possibles dans le cadre de la procédure d'octroi de permis de construire	91