

1

2

3

4

5

6

7

---

## Préface de l'éditeur

Tenus par la loi de couvrir intégralement les dommages immobiliers causés par les dangers naturels assurés, les Etablissements cantonaux d'assurance mettent l'accent sur les mesures préventives. Leurs efforts sont axés sur la protection concrète des bâtiments – la protection des objets. En revanche, il incombe toujours aux pouvoirs publics de réduire les effets possibles des dangers menaçant de vastes périmètres, en prenant des mesures d'aménagement du territoire et de protection générale dans un souci de prévention à grande échelle.

Au vu des sinistres qui surviennent, il apparaît de plus en plus clairement qu'il faut impérativement combiner la protection générale et la protection d'objets concrets pour que la préparation et la prévention puissent être efficaces. Le potentiel de dommages a augmenté, de même que la vulnérabilité des constructions. Les dévastations consécutives à des phénomènes naturels témoignent de cette évolution. Des possibilités concrètes de protection sont requises.

Les présentes recommandations sont essentiellement destinées aux spécialistes de la planification, aux architectes et aux ingénieurs, mais aussi aux autorités. Elles décrivent des situations de danger, présentent des mesures de protection des objets et expliquent comment les dimensionner. Il s'agit de la mise à jour d'un document éprouvé par des professionnels, qui a été édité par l'Etablissement cantonal d'assurance de St-Gall. La nouvelle version, destinée à l'ensemble de la Suisse, tient compte des normes SIA les plus récentes consacrées aux structures porteuses et correspond de ce fait à l'état actuel de la technique.

Les présentes recommandations sont dépourvues de caractère obligatoire. C'est donc volontaire-

ment que les exigences minimales et les objectifs de protection n'ont pas été cernés concrètement. Cependant, les instances fédérales, cantonales et communales, qui restent compétentes en la matière, doivent pouvoir disposer de bases techniques pertinentes pour édicter leurs mesures. Le but de ces recommandations est de servir d'instrument permettant de protéger efficacement des objets concrets.

---

### Etablissements cantonaux d'assurance

#### **AG**

Aargauische Gebäudeversicherungsanstalt, Bleichemattstrasse 12/14, 5001 Aarau, Telefon 0848 836 800, Telefax 062 836 36 26, E-Mail [info@ava.ag.ch](mailto:info@ava.ag.ch), [www.versicherungsamt.ch](http://www.versicherungsamt.ch)

#### **AR**

Assekuranz AR, Gebäudeversicherung Poststrasse 10, 9102 Herisau, Telefon 071 353 00 53, Telefax 071 353 00 59, E-Mail [info@assekuranz.ch](mailto:info@assekuranz.ch), [www.assekuranz.ch](http://www.assekuranz.ch)

#### **BE**

Assurance immobilière Berne, Papiermühlestrasse 130, 3063 Ittigen, Téléphone 031 925 11 11, Téléfax 031 925 12 22, E-mail [info@gvb.ch](mailto:info@gvb.ch), [www.aib.ch](http://www.aib.ch)

#### **BS**

Gebäudeversicherung des Kantons Basel-Stadt, Hirschgässlein 21, 4051 Basel, Telefon 061 205 30 00, Telefax 061 205 30 10, E-Mail [gvbs@gvbs.ch](mailto:gvbs@gvbs.ch), [www.gvbs.ch](http://www.gvbs.ch)

#### **BL**

Basellandschaftliche Gebäudeversicherung, Rheinstrasse 33A, 4410 Liestal, Telefon 061 927 11 11, Telefax 061 927 12 12, E-Mail [bgv@bgv.bl.ch](mailto:bgv@bgv.bl.ch), [www.bgv.bl.ch](http://www.bgv.bl.ch)

#### **FR**

Etablissement cantonal d'assurance des bâtiments, Maison-de-Montenach 1, 1700 Fribourg/Granges-Paccot, Téléphone 026 305 92 92, Téléfax 026 305 92 91, E-mail [ecab@fr.ch](mailto:ecab@fr.ch), [www.ecab.ch](http://www.ecab.ch)

#### **GL**

Kantonale Sachversicherung Glarus, Zwinglistrasse 6, 8750 Glarus, Telefon 055 645 61 61, Telefax 055 645 61 95, E-Mail [versicherung@gsv.ch](mailto:versicherung@gsv.ch), [www.gsv.ch](http://www.gsv.ch)

#### **GR**

Gebäudeversicherung des Kantons Graubünden, Ottostrasse 22, 7001 Chur, Telefon 081 257 39 08, Telefax 081 257 39 59, E-Mail [info@gva.gr.ch](mailto:info@gva.gr.ch), [www.gva.gr.ch](http://www.gva.gr.ch)

#### **JU**

ECA Jura, Etablissement cantonal d'assurance immobilière et de prévention, Rue de la Gare 14, 2350 Saignelégier, Téléphone 032 952 18 40, Téléfax 032 951 23 73, E-mail [info@eca-jura.ch](mailto:info@eca-jura.ch), [www.eca-jura.ch](http://www.eca-jura.ch)

#### **LU**

Gebäudeversicherung des Kantons Luzern, Hirschengraben 19, 6002 Luzern, Telefon 041 227 22 22, Telefax 041 227 22 23, E-Mail [mail@gvl.ch](mailto:mail@gvl.ch), [www.gvl.ch](http://www.gvl.ch)

#### **NE**

Etablissement cantonal d'assurance et de prévention, Place de la Gare 4, 2002 Neuchâtel, Téléphone 032 889 62 22, Téléfax 032 889 62 33, E-mail [ecap@ne.ch](mailto:ecap@ne.ch), [www.ecap-ne.ch](http://www.ecap-ne.ch)

#### **NW**

Nidwaldner Sachversicherung, Stansstadterstrasse 54, 6370 Stans, Telefon 041 618 50 50, Telefax 041 618 50 60, E-Mail [nsv@nsv.ch](mailto:nsv@nsv.ch), [www.nsv.ch](http://www.nsv.ch)

#### **SG**

Gebäudeversicherungsanstalt des Kantons St.Gallen, Davidstrasse 37, 9001 St.Gallen, Telefon 071 226 70 30, Telefax 071 226 70 29, E-Mail [info@gvasg.ch](mailto:info@gvasg.ch), [www.gvasg.ch](http://www.gvasg.ch)

#### **SH**

Gebäudeversicherung des Kantons Schaffhausen, Herrenacker 9, 8200 Schaffhausen, Telefon 052 632 71 11, Telefax 052 624 15 14, E-Mail [info.gv@ktsh.ch](mailto:info.gv@ktsh.ch), [www.gv.sh.ch](http://www.gv.sh.ch)

---

### Etablissements cantonaux d'assurance

#### **SO**

Solothurnische Gebäudeversicherung,  
Baselstrasse 40,  
4500 Solothurn,  
Telefon 032 627 97 00,  
Telefax 032 627 97 10,  
E-Mail [info@sgvso.ch](mailto:info@sgvso.ch), [www.sgvso.ch](http://www.sgvso.ch)

#### **TG**

Thurgauer Gebäudeversicherung,  
Promenade 8,  
8510 Frauenfeld,  
Telefon 052 724 24 87,  
Telefax 052 724 25 82,  
E-Mail [info@gvtg.ch](mailto:info@gvtg.ch), [www.gvtg.ch](http://www.gvtg.ch)

#### **VD**

Etablissement d'assurance contre  
l'incendie et les éléments naturels du  
canton de Vaud,  
Avenue Général-Guisan 56,  
1009 Pully,  
Téléphone 021 721 21 21,  
Téléfax 021 721 21 22,  
E-mail [webmaster@eca-vaud.ch](mailto:webmaster@eca-vaud.ch),  
[www.eca-vaud.ch](http://www.eca-vaud.ch)

#### **ZG**

Gebäudeversicherung Zug,  
Poststrasse 10,  
6300 Zug,  
Telefon 041 726 90 90,  
Telefax 041 726 90 99,  
E-Mail [info@gvzg.zg.ch](mailto:info@gvzg.zg.ch), [www.gvzg.ch](http://www.gvzg.ch)

#### **ZH**

Gebäudeversicherung Kanton Zürich,  
Thurgauerstrasse 56,  
8050 Zürich,  
Telefon 044 308 21 11,  
Telefax 044 303 11 20,  
E-Mail [info@gvz.ch](mailto:info@gvz.ch), [www.gvz.ch](http://www.gvz.ch)

## Impressum

Tous droits réservés.  
© 2005  
Association des établissements  
cantonaux d'assurance incendie  
(AEAI)  
Bundesgasse 20  
CH-3001 Berne  
Tél.: 031 320 22 11  
Fax: 031 320 22 99  
<http://www.vkf.ch>



Auteur:  
Dr. Thomas Egli  
Egli Engineering  
Lerchenfeldstrasse 5  
CH-9014 St. Gallen  
<http://www.naturgefahr.ch>



**Egli Engineering**

Dessins techniques:  
Christoph Roth  
Ingenieure Bart AG, St.Gallen

Remerciements:  
L'auteur remercie les personnes  
suivantes pour leurs précieuses  
contributions:  
Jörg Rutz  
Gebäudeversicherungsanstalt  
des Kantons St. Gallen  
Dieter Balkow  
Institut suisse du verre dans le  
bâtiment, Zurich  
Urs Thali  
Ingenieurbüro, Göschenen  
Hans Züger  
AG Kraftwerk Wägital  
Johann Toggwiler  
Gebäudeversicherungsanstalt des  
Kantons Graubünden  
Famille Lieberherr, Necker  
Dr. Armin Petrascheck  
Office fédéral des eaux et de  
la géologie, Bienne  
Stefan Margreth, Institut fédéral  
pour l'étude de la neige et des  
avalanches, Davos  
Werner Gerber, Institut fédéral de  
recherches sur la forêt, la neige et

le paysage, Birmensdorf  
Prof. Dr. Dieter Rickenmann,  
Universität für Bodenkultur, Wien

Traduction:  
Christian Marro  
Haute-Nendaz

Révision de la traduction:  
Blaise Duvernay  
Office fédéral des eaux et de la  
géologie (OFEG)  
Thierry Berset  
ECAB-Fribourg

Graphisme:  
vkw st.gallen michael niederer /  
rosmarie winkler / remo gamper

Crédit photographique:  
Egli Engineering, St. Gallen  
Ingenieure Bart AG, St. Gallen  
US Army Corps of Engineers  
ENA, Davos  
Kantonsforstamt, Glarus  
WSL, Birmensdorf  
Tiefbauamt des Kantons St. Gallen  
Ingenieurbüro Thali, Göschenen  
Rüegger Geotechnik AG, St. Gallen  
Geo 7 AG, Bern  
Kellerhals & Haefeli AG, Bern  
Neo Vac AG, Oberriet  
Uretek, Giswil  
OFEG, Bienne  
AIB, Berne  
Fatzner AG, Romanshorn  
Service des forêts et de la faune,  
Givisiez  
Kessel GmbH, Lenting (D)

Proposition de citation:  
EGLI Thomas, Recommandations  
Protection des objets contre les  
dangers naturels gravitationnels,  
Association des établissements  
cantonaux d'assurance  
incendie (Ed.),  
Berne, 2005.

ISBN 3-033-00470-9  
ISBN 3-033-00469-5 (Deutsch)

---

**Exclusion de la  
responsabilité**

La présente publication a été élaborée avec le plus grand soin. Elle correspond à l'état actuel de la science et de la technique. Cependant, il est souligné expressément que des dommages peuvent survenir même si les mesures proposées sont respectées. En règle générale, les mesures proposées ne permettent d'empêcher des dommages ou de diminuer leur ampleur que jusqu'à un certain point; elles ne garantissent aucunement qu'aucun dommage ne surviendra. En outre, il est précisé expressément que la présente publication contient des instructions visant à empêcher des dommages matériels prévisibles ordinairement occasionnés par les dangers naturels décrits, ou à diminuer l'ampleur de ces dommages. Les événements soudains ou extrêmes peuvent causer des dommages considérables même si les mesures proposées sont respectées. Dans tous les cas, l'application d'une mesure doit être contrôlée et adaptée en fonction de chaque cas particulier.

**Toute responsabilité de l'AEAI pour des dommages matériels ou corporels survenus malgré, par suite, ou en relation avec le respect ou l'application de la présente publication est exclue. Quiconque respecte ou applique cette publication adhère expressément à cette exclusion de responsabilité.**





Table des matières

Introduction

1

Avalanches

2

Crues

3

Glissements de terrain

4

Laves torrentielles

5

Chutes de pierres

6

Annexe

7

## Dangers naturels?

Les présentes recommandations traitent des dangers naturels suivants:

- Avalanches
- Crues
- Glissements de terrain
- Laves torrentielles
- Chutes de pierres

Ces phénomènes dangereux, qui surviennent chaque année, causent parfois d'importants dommages aux bâtiments. Lorsque c'est réalisable, on s'efforce d'esquiver le danger

en utilisant l'espace disponible. Mais considérons par exemple les inondations: il est clair qu'il n'est pas toujours possible de s'installer à l'abri de ce phénomène dans notre espace vital limité. Si le danger lui-même ne peut pas être réduit moyennant un coût raisonnable, il faut protéger les bâtiments en prenant des mesures dites «de protection des objets».

## Protection des objets?

La protection des objets représente une solution efficace pour réduire le risque encouru par les personnes et par les biens. Le bâtiment considéré sera conçu de manière à être peu vulnérable aux phénomènes le menaçant, si bien qu'ils ne pourront lui occasionner que des dommages mineurs.

Des adaptations de faible ampleur permettent souvent d'éviter à bon escient que de nouvelles constructions subissent des dommages. En cas de danger d'inondation,

des dommages considérables peuvent être évités de la sorte sans qu'il faille limiter l'utilisation des bâtiments ni supporter un coût supplémentaire.

D'une manière générale, les stratégies suivantes peuvent être appliquées pour protéger des objets:

Type de danger	Construction	Stratégie de protection des objets
Avalanche	Existante	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Renforcement des ouvertures et des parois extérieures</li> <li>· Construction de digues ou d'étraves (effet d'écran)</li> </ul>
	Nouvelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Emplacement des ouvertures, forme de l'ouvrage, renforcement</li> <li>· Construction de digues ou d'étraves, exécution sous forme de toit-terrain</li> </ul>
Crue	Existante	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Protection contre le reflux dans les canalisations, ancrage des citernes à mazout</li> <li>· Surélévation des soupiraux, construction de digues ou de murs</li> <li>· Etanchement des ouvertures et des parois extérieures</li> </ul>
	Nouvelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Surélévation du rez-de-chaussée ou des ouvertures</li> <li>· Concept approprié d'utilisation des espaces intérieurs</li> <li>· Agencement sur remblai ou construction de murs et de digues</li> </ul>

Type de danger	Construction	Stratégie de protection des objets
Glissement de terrain et effondrement	Existante	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Introductions des conduites souples, évacuation des eaux pluviales</li> <li>· Stabilisation de la masse en glissement, renforcement du bâtiment</li> </ul>
	Nouvelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Aménagement du terrain, choix du site, rigidité du bâtiment</li> <li>· Stabilisation et renforcement</li> </ul>
Lave torrentielle et coulée de boue	Existante	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Renforcement des ouvertures et des parois extérieures</li> <li>· Construction de digues ou d'étraves (effet d'écran)</li> </ul>
	Nouvelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Forme de l'ouvrage, emplacement et hauteur des ouvertures, renforcement</li> <li>· Construction de digues ou d'étraves, position surélevée</li> </ul>
Chute de pierres et de blocs	Existante	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Coffrage et renforcement</li> <li>· Construction de digues, murs ou filets (effet d'écran)</li> </ul>
	Nouvelle	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Emplacement des ouvertures et concept d'utilisation de l'espace extérieur</li> <li>· Coffrage et renforcement des parois extérieures</li> <li>· Construction de digues, murs ou filets, exécution sous la forme de toit-terrain</li> </ul>

Quel que soit l'éventail des solutions offertes, la protection des objets est confrontée à des limites techniques. Elles sont atteintes lorsque les événements ont une intensité exceptionnelle (danger élevé selon la carte de dangers). Les renforcements usuels ne permettent pas de s'opposer aux

contraintes qui règnent alors. Pour cela, il faudrait construire de véritables bunkers. Indépendamment du danger encouru par les bâtiments, signalons que l'accès aux biens-fonds peut comporter des risques lorsqu'un événement se produit, et qu'il peut s'en trouver impraticable.

Les présentes recommandations s'adressent aux ingénieurs, aux architectes et aux autorités en charge de la construction. Les exposés et les renseignements qu'elles proposent devraient permettre d'élaborer des solutions sur mesure pour sécuriser les nouvelles constructions, les transformations ou, d'une manière générale, tous les objets nécessitant une protection. Les autorités locales en charge de la construction contrôlent la pertinence des mesures prévues dans le cadre des procédures d'octroi de permis

de construire. A l'heure actuelle, des premières cartes de dangers décrivent la nature et le degré du danger qui menace des zones habitées. La situation varie d'un canton à l'autre, mais d'importants efforts sont consentis pour élaborer ces documents. Là où ces cartes font défaut, le danger doit être évalué sur la base de descriptions des événements historiques ou en faisant appel à un spécialiste des dangers naturels.

6 Qui est concerné, et quand?

Dangers naturels

Les principaux dangers naturels auxquels la Suisse est confrontée peuvent être classés comme suit:

Classes	Types de dangers
Dangers gravitationnels	Avalanches, crues, glissements de terrain, laves torrentielles, chutes de pierres et de blocs, éboulements, écroulements, chutes de glace
Dangers climatiques	Sécheresse, vagues de froid ou de chaleur, tempêtes, grêle, pluies intenses, neige
Dangers tectoniques	Tremblements de terre

La classe des dangers gravitationnels est intimement liée à la situation locale, ce qui implique que ces dangers ne sont pas présents en tout lieu. Ils sont localisés dans l'espace et il n'est pas rare que des zones de danger élevé côtoient des zones sûres. C'est pourquoi ces dangers revêtent une grande importance pour l'aménagement du territoire.

Lorsqu'on parle de «zones de danger» dans le cadre de plans directeurs ou de plans d'affectation (plans de zones communaux), on entend par là les périmètres menacés par des dangers gravitationnels. Ces derniers sont principalement dus à l'action de la gravité et leur zone d'effet est généralement délimitée par la topographie.

Il découle de ces caractéristiques qu'on peut échapper aux dangers gravitationnels en se déplaçant dans l'espace, ce qui n'est guère possible face aux dangers climatiques et tectoniques qui affectent la Suisse. Ainsi, tout bâtiment est par exemple exposé aux tremblements de terre. C'est pourquoi les mesu-

res de protection des objets contre les actions sismiques font désormais partie intégrante des normes de construction.

En revanche, les effets des dangers gravitationnels ne doivent être pris en considération que dans les projets de construction en zone de danger (cf. « Prescriptions types pour les règlements de construction » à la fin de ce chapitre). On localise les zones menacées en procédant à des analyses de danger, puis on les fait figurer dans des cartes de dangers. Les résultats sont pris en compte pour l'aménagement du territoire et intégrés dans les règlements de construction applicables aux périmètres concernés.

1

Les différents dangers gravitationnels sont décrits sous l'angle du danger qu'ils font peser sur les objets concernés.

Ce n'est donc ni le déclenchement ni le déroulement du phénomène naturel traité qui figure au centre du propos, mais son mode d'action.

2

### Avalanches

Les avalanches peuvent être classées selon divers critères. La distinction entre avalanches coulantes et poudreuses est pertinente du point de vue des mesures visant à protéger des objets. Autre phé-

nomène requérant des mesures de protection, le glissement de la neige est également traité sous cette rubrique.

3

### Avalanches: Avalanches coulantes

Les masses neigeuses dévalent la pente principalement en coulant ou en glissant. Les blocs de neige, de diverses tailles, restent en contact avec le sol. La densité d'une avalanche coulante est comparable à celle du manteau neigeux déposé naturellement. On parle d'avalanche superficielle lorsque le plan de glissement se trouve à l'intérieur du manteau neigeux dans la zone de rupture, tandis qu'une avalanche de fond commence à glisser sur le sol. Une avalanche de fond avec arrachement désigne une avalanche de printemps, lourde et

mouillée, qui charrie des matériaux étrangers et s'écoule généralement dans une section en forme de ravine. Les avalanches coulantes ont une vitesse de 10 à 40 m/s le long de leur trajectoire. Elles génèrent des pressions dynamiques à même de détruire des bâtiments.

4



5

### Avalanches: Avalanches poudreuses

Les avalanches poudreuses se développent toujours à partir d'avalanches coulantes. Elles se composent d'un nuage de neige tourbillonnant qui se déplace en jaillissant dans l'air. Les avalanches purement poudreuses, sans composante coulante, ne se rencontrent que lorsqu'une avalanche coulante se trouve entièrement en suspension lors d'une chute en terrain raide ou lorsque la composante coulant au sol et la poussière de neige sont séparées en raison des caractéristiques du terrain. Par rapport aux avalanches coulantes, la densité des avalanches poudreuses est nettement moindre et leur hauteur notablement supérieure. Leur vitesse est de 20 à 80 m/s. Elles peuvent même causer des dommages sur de vastes périmètres dans le versant opposé. Leur souffle est capable de renverser

des arbres et des pylônes ou d'endommager gravement des fenêtres et des toits de bâtiments. La poussière de neige comprimée contre les façades reste visible un certain temps.

6



7

### Avalanches: Glissement de la neige

Les talus lisses et très ensoleillés sont parfois le siège de mouvements continus de glissement et de reptation du manteau neigeux. Les glissements marqués peuvent être soulignés par une rupture typique en forme de croissant. L'arrière des bâtiments subit alors des forces

considérables dues à la pression de la neige.



### Crues

Les crues sont dangereuses par l'érosion des berges et par les inondations qu'elles provoquent. Du point de vue de la protection

des objets, il faut tenir compte des effets de l'eau, mais aussi des matériaux solides entraînés par les crues (matériaux charriés, sédiments, bois flottant, etc.).

### Crues: Erosion des berges

Les effets de l'érosion des berges sont de deux natures. Ils comprennent les atteintes directement occasionnées par le courant et le glissement des berges. Le critère prépondérant pour la sécurité des bâtiments et des installations exposés aux atteintes directes du courant est leur résistance vis-à-vis des actions dynamiques de l'eau et des matériaux solides charriés. Dans le cas du glissement des berges, c'est la profondeur des fondations qui est déterminante. Les berges affouillées, les

goulets d'étranglement et les emplacements comportant des obstacles à l'écoulement sont particulièrement exposés à l'érosion des berges.



### Crues: Inondations

Le développement des inondations diffère selon la topographie du site affecté et du type de débordement hors des cours d'eau. En terrain plat, de type plateau, et autour des lacs, les vitesses d'écoulement et de montée des eaux sont généralement assez faibles. Le paramètre prépondérant pour l'ampleur des dommages est la hauteur maximale d'inondation. En terrain raide ou en forme de cuvette, ainsi qu'aux environs des resserrments du lit des cours d'eau (localités), il faut s'attendre à des vitesses d'écoulement supérieures. Il en va de même à proximité des brèches dans les digues. Dans ce cas, les paramètres prépondérants pour l'ampleur des dommages sont la hauteur d'inondation et la vitesse d'écoulement. A l'intérieur des périmètres inondés, des dommages peuvent aussi être

provoqués localement par des phénomènes d'érosion et d'alluvionnement. Les dommages subis par les objets sont dus aux actions dynamiques ainsi qu'à l'humidité et à l'incrustation de saouilles.



### 1 Glissements de terrain

Les glissements de terrain peuvent être classés selon divers critères. Du point de vue de la protection des objets, le paramètre principal est la profondeur du plan de glissement.

### 2 Glissements de terrain: Glissements superficiels

Sont dits superficiels les glissements de terrain dont le plan de glissement se trouve à une profondeur maximale de 2 m. Le volume des matériaux solides déplacés est limité. Il s'agit habituellement de phénomènes qui se déclenchent spontanément lors de précipitations exceptionnelles. Des épisodes pluvieux intenses et de longue durée sont à l'origine de pressions interstitielles élevées dans le sol. Les glissements de terrain peuvent dégénérer en coulées de boue lorsque le sol est fortement saturé en eau (cf. « coulées de boue » deux pages plus loin). Les glissements superficiels sont rarement en mouvement continu. Si l'on rencontre souvent des phénomènes de reptation du sol, ils ne sont pas liés à un plan de glissement au sens propre.

3

4

### 5 Glissements de terrain: Glissements semi-profonds à profonds

On parle de glissement semi-profond lorsque le plan de glissement se trouve à une profondeur de 2 à 10 m et de glissement profond lorsqu'il est à plus de 10 m. Le mode de formation de ce plan et l'évolution du mouvement peuvent être fort différents. Il existe de nombreuses formes intermédiaires entre les deux extrêmes que sont le glissement continu et le mouvement spontané unique. La surface de glissement peut être incurvée comme une demi-sphère (glissement rotationnel) ou plane (glissement translationnel, à la manière d'un tiroir). Ici également, toutes sortes de formes intermédiaires sont possibles selon la constitution du terrain.

Ces types de glissements mettent en mouvement des volumes solides supérieurs de plusieurs ordres de grandeur aux masses mises en

Les actions des glissements superficiels sur les ouvrages sont dues à la poussée générée par les masses de terre en mouvement. En ce qui concerne les bâtiments, il s'agit généralement d'actions sur les parois extérieures, qui n'affectent pas les fondations.



jeu par les glissements superficiels. C'est pourquoi ils génèrent rapidement des forces de poussée qu'on ne peut plus contraindre, ou alors au prix d'ouvrages de soutènement très onéreux. En règle générale, les bâtiments situés sur de tels glissements sont entièrement entraînés par le mouvement. L'ampleur des dommages qu'ils subissent dépend notamment de la grandeur et de l'homogénéité des vitesses de mouvement sur l'ensemble du corps en glissement.



7

### Glissements de terrain: Phénomènes de tassement et d'effondrement

Des phénomènes de tassement et d'effondrement se produisent lorsque des matériaux solides sont soustraits dans le sous-sol. Ce processus est dû à la lixiviation d'une roche souterraine soluble (gypse,

cornieule, calcaire) ou au lessivage de fractions fines (érosion interne). Il se manifeste en surface par des mouvements verticaux graduels (tassement) ou spontanés (effondrement).



### Laves torrentielles

Une simplification sommaire consiste à considérer la lave torrentielle comme une forme intermédiaire entre la crue et le glissement de terrain. Ce processus est aussi couramment assimilé à des phénomènes tels que coulées de boue ou de débris. Les laves torrentielles descendent dans le lit de cours d'eau raides et sur des pentes de forte déclivité (coulées de boue). Le passage d'une lave torrentielle dans le lit d'un cours d'eau pro-

voque souvent une importante érosion latérale et verticale. L'action générée dans ce cas est comparable à l'action provoquée par l'érosion des berges lors d'une crue. Lorsqu'une lave torrentielle déborde, on parle en allemand d'«Übermürung», terme sans équivalent en français qui désigne un dépôt de lave torrentielle constitué de blocs, d'éboulis et d'alluvions.

### Laves torrentielles: Dépôts issus de lits de cours d'eau (laves torrentielles au sens propre)

L'action prépondérante de la lave torrentielle est la force de poussée due au mélange d'eau et de matériaux solides charriés. Selon la topographie et l'agencement

de l'ouvrage affecté, celui-ci sera simplement contourné ou submergé par les eaux. Il pourra aussi subir des chocs.



### 1 Laves torrentielles: Dépôts issus de pentes (coulées de boue)

Les coulées de boue se forment sur des pentes relativement raides. Les masses de matériaux meubles saturés se mettent subitement en mouvement. La teneur en eau élevée facilite leur écoulement, ce qui peut provoquer la mobilisation de tout le corps instable. L'action sur les constructions est comparable à l'action générée par le dépôt d'une lave torrentielle issue du lit d'un cours d'eau.



### 2

### 3 Phénomènes de chute

Sont examinées ici la chute de pierres et la chute de blocs. La chute de glace sera traitée par analogie, en modifiant uniquement la masse volumique. L'éboulement et l'écroulement ne sont pas abordés

dans ce contexte, car ils mettent en jeu des masses et des énergies qui dépassent les possibilités des mesures de protection des objets.

### 4 Phénomènes de chute: Chutes de pierres et de blocs

Ces phénomènes sont caractérisés par la chute sporadique de pierres (diamètre moyen  $< 0.5$  m) ou de blocs (diamètre moyen  $> 0.5$  m) plus ou moins isolés. Ce processus, répété ou soumis à des pointes saisonnières, témoigne de la désagrégation continue d'une zone de décrochement, telle que falaise rocheuse, déterminée par les conditions géologiques et par l'altération. Les vitesses de chute vont généralement de 5 m/s à plus de 30 m/s. En ce qui concerne le mode de mouvement, il y a lieu de

faire une distinction entre le saut et le roulement. En règle générale, la vitesse des pierres et des blocs diminue régulièrement dans les pentes de déclivité inférieure à  $30^\circ$ . La longueur des sauts diminue simultanément. Les forêts ou autres zones boisées denses absorbent également une part plus ou moins importante de l'énergie des corps en mouvement. L'action sur les ouvrages est due à la force de poussée des projectiles, qui est essentiellement déterminée par leur vitesse et par leur masse.

5

6

7



Méthode d'élaboration des cartes de dangers

Les explications à ce propos sont basées sur les directives et recommandations fédérales suivantes:

- Directives pour la prise en considération du danger d'avalanches lors de l'exercice d'activités touchant l'organisation du territoire. Office fédéral des forêts, Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches, 1984.
- 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, Office fédéral de l'aménagement du territoire, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, 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'environnement, des forêts et du paysage, Office fédéral de l'économie des eaux, Office fédéral de l'aménagement du territoire, 1997.

La carte de dangers se compose d'une carte proprement dite et d'un rapport explicatif. La carte indique les degrés de danger, tandis que le texte fournit les explications et motivations requises.

Degrés de danger

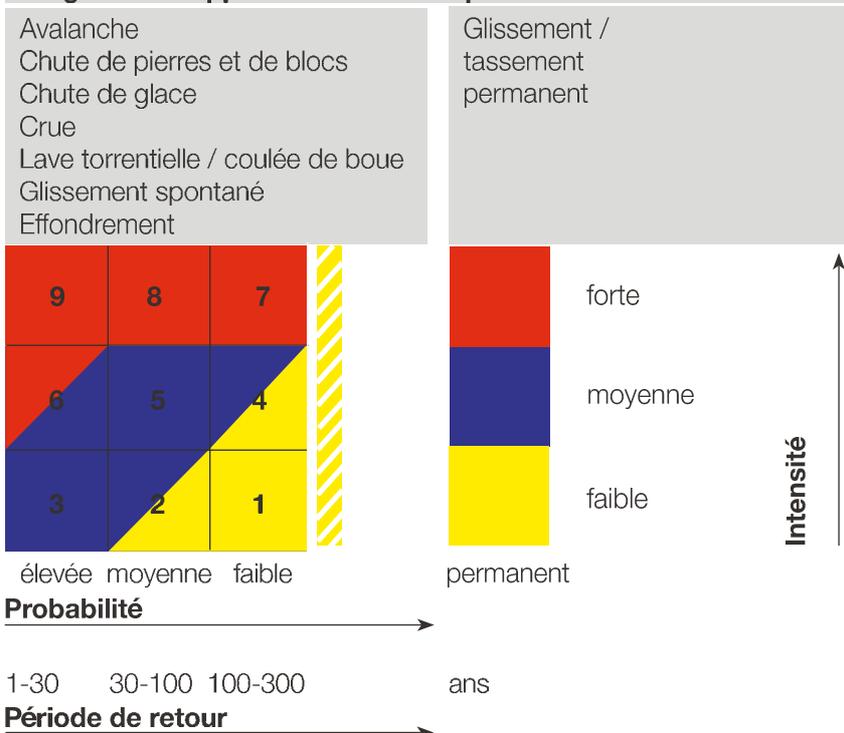
La carte de dangers, colorée en rouge, bleu, jaune et blanc, rend compte de l'importance des zones de danger pour l'aménagement du territoire, principalement en ce qui concerne la construction de bâtiments:

Zone de danger	Signification au plan technique	Importance pour l'aménagement du territoire
rouge	danger élevé	zone d'interdiction
bleu	danger moyen	zone de réglementation
jaune	danger faible	zone de sensibilisation
jaune-blanc	danger résiduel (intensité forte, probabilité très faible)	zone de sensibilisation
blanc	aucun danger connu ou danger négligeable selon l'état des connaissances actuelles	aucune limitation

Ce schéma simple est conçu pour une utilisation du terrain comportant des habitations.

Les couleurs caractérisant les zones de danger résultent de la combinaison de l'intensité et de la probabilité (fréquence ou période de retour) des phénomènes menaçants. Afin de prendre en compte les différences entre ces phénomènes, qui peuvent être très importantes, on applique des diagrammes spécifiques à chacun d'entre eux.

**Diagrammes applicables selon les processus**



Pour tous les phénomènes non permanents, il est en principe possible de faire figurer le danger résiduel dans la carte de dangers. Les chiffres désignant les champs de la matrice en couleurs symbolisent précisément la combinaison d'intensité et de probabilité à laquelle on est confronté.

Les classes d'intensité relatives aux différents types de dangers sont définies à la page suivante. Les recommandations fédérales ne préconisent aucun paramètre pour déterminer l'intensité des glissements spontanés et des effondrements.

Classes d'intensité

Phénomène	Intensité faible	Intensité moyenne	Intensité forte
Avalanche	$q < 3 \text{ kN/m}^2$	$3 \text{ kN/m}^2 < q < 30 \text{ kN/m}^2$	$q > 30 \text{ kN/m}^2$
Inondation, y compris épandage d'alluvions	$h_f < 0.5 \text{ m}$ ou $v_f * h_f < 0.5 \text{ m}^2/\text{s}$	$0.5 \text{ m} < h_f < 2 \text{ m}$ ou $0.5 < v_f * h_f < 2 \text{ m}^2/\text{s}$	$h_f > 2 \text{ m}$ ou $v_f * h_f > 2 \text{ m}^2/\text{s}$
Erosion des berges	$h_u < 0.5 \text{ m}$	$0.5 \text{ m} < h_u < 2 \text{ m}$	$h_u > 2 \text{ m}$
Lave torrentielle et coulée de boue	n'existe pas	$h_f < 1 \text{ m}$ ou $v_f < 1 \text{ m/s}$	$h_f > 1 \text{ m}$ et $v_f > 1 \text{ m/s}$
Chute de pierres / blocs	$E < 30 \text{ kJ}$	$30 \text{ kJ} < E < 300 \text{ kJ}$	$E > 300 \text{ kJ}$
Glissement / tassement permanent	$v_f \leq 2 \text{ cm/an}$	$2 \text{ cm/an} < v_f < 1 \text{ dm/an}$	$v_f > 1 \text{ dm/an}$ ou forts mouvements différentiels
Glissement spontané / glissement de berge	$h_r < 0.5 \text{ m}$	$0.5 \text{ m} < h_r < 2 \text{ m}$	$h_r > 2 \text{ m}$
Effondrement	n'existe pas	$h_s < 0.5 \text{ m}$ et $A_E < 1 \text{ are}$	$h_s > 0.5 \text{ m}$ ou $A_E > 1 \text{ are}$

E: énergie cinétique (cumul des énergies de translation et de rotation)  
 q: pression  
 h<sub>f</sub>: hauteur d'eau  
 h<sub>r</sub>: profondeur du plan de glissement  
 h<sub>s</sub>: hauteur de l'effondrement

v<sub>f</sub>: vitesse  
 A<sub>E</sub>: superficie de l'entonnoir d'effondrement  
 h<sub>u</sub>: profondeur d'érosion de la berge

Classes de fréquence

En vertu des recommandations fédérales citées précédemment, il y a lieu de distinguer les quatre classes de fréquence suivantes lorsqu'il s'agit de déterminer la probabilité d'occurrence ou la période de retour d'un événement

dans le cadre de l'appréciation du danger:

Probabilité	Période de retour
Elevée	1 à 30 ans
Moyenne	30 à 100 ans
Faible	100 à 300 ans
Très faible	plus de 300 ans

Cartes d'intensités

Des cartes dites d'intensités sont dressées pour chaque classe de fréquence étudiée. Elles restituent les trois classes d'intensité selon les recommandations fédérales pour tous les événements pris en compte dans chacune de ces

classes. Les actions déterminantes pour dimensionner les mesures de protection des objets peuvent être tirées de ces cartes d'intensités.

1 Référence à la norme SIA 260

Les présentes recommandations complètent les normes SIA 260, 261 et 261/1 en ce qui concerne l'action des dangers gravitationnels sur les bâtiments. Fixant la procédure à suivre pour déterminer les actions, elles fournissent une base homogène pour élaborer des projets. Elles se basent en outre sur la norme SIA 260 pour ce qui a trait au choix du concept de dimensionnement. Les objectifs de

protection doivent être définis dans la convention d'utilisation et le concept de protection stipulé dans la base du projet.

*Sécurité structurale*

Les points suivants peuvent être établis en s'appuyant sur des directives comparables complétant les normes SIA 260, 261 et 261/1:

2

3

Période de retour	Référence à la norme SIA 260
1 à 30 ans	Les intensités calculées (= actions) dans les cartes d'intensités correspondent à la valeur $F_d$ selon la norme SIA 260, chiffre 4.4.2.1 $\gamma_F = 1.5$ (facteur de charge)
Plus de 30 ans et jusqu'à 100 ans	Les intensités calculées (= actions) dans les cartes d'intensités sont augmentées des facteurs de charge suivants pour correspondre à la valeur de calcul $A_d$ selon la norme SIA 260, chiffre 3.2.2.8: $\gamma_F = 1.3$ : facteur de charge pour les avalanches, les laves torrentielles et les chutes de pierres $\gamma_F = 1.2$ : facteur de charge pour les crues et les glissements de terrain
Plus de 100 ans	Les intensités calculées (= actions) dans les cartes d'intensités sont augmentées des facteurs de charge suivants pour correspondre à la valeur de calcul $A_d$ selon la norme SIA 260, chiffre 3.2.2.8: $\gamma_F = 1.2$ : facteur de charge pour les avalanches, les laves torrentielles et les chutes de pierres $\gamma_F = 1.1$ : facteur de charge pour les crues et les glissements de terrain

$F_d$ : action normale  
 $A_d$ : action accidentelle

*Aptitude au service*

Les exigences concernant l'aptitude au service et les actions qu'il y a lieu de prendre en compte pour procéder aux vérifications nécessaires doivent être fixées en commun par l'auteur du projet et par le maître de l'ouvrage, puis elles seront stipulées dans la base du projet selon la norme SIA 260.

4

5

6

7

La subdivision en trois degrés de danger exposée à la page 17 et ses répercussions sur l'aménagement du territoire et le droit de la construction acquièrent

Sont qualifiés de zones de danger naturel les secteurs menacés par des phénomènes de crue, lave torrentielle, avalanche, glissement de terrain, chute de pierres, chute de blocs, éboulement ou chute de glace.

Les ouvrages et les aménagements situés dans les zones de danger naturel doivent satisfaire à des exigences particulières concernant la protection des personnes et des biens. Les recommandations « Protection des objets contre les dangers naturels gravitationnels » éditées par les Etablissements cantonaux d'assurance sont déterminantes à cet effet. Les prescriptions suivantes s'appliquent aux différentes zones de danger:

a) Zone de danger rouge: les ouvrages et les aménagements existants peuvent être entretenus et rénovés de manière pertinente. La mise en œuvre de mesures plus importantes, découlant par exemple de l'obligation de réaliser des mesures visant à protéger les objets concernés, demeure réservée. La construction de nouveaux ouvrages ou aménagements est interdite.

b) Zone de danger bleue: les ouvrages et les aménagements existants peuvent être entretenus et rénovés de manière pertinente. Les modifications plus importantes (transformations, extensions, remplacements, nouvelles constructions) ne sont admises que si le projet de construction comprend les mesures de protection des objets requises.

c) Zone de danger jaune: les transformations, extensions, remplacements et nouvelles constructions sont admis. Les mesures de protection des objets requises doivent être prises obligatoirement lorsqu'un ouvrage ou un aména-

un statut contraignant par le biais des prescriptions types suivantes, applicables aux règlements de construction (exemple du canton de St-Gall):

gement public est concerné. C'est également le cas lorsqu'un projet de construction particulier porte, par exemple, sur un ouvrage destiné à des rassemblements importants de personnes, comprenant des biens de valeur élevée ou présentant un potentiel important de dommages consécutifs. Pour les autres ouvrages et aménagements, la mise en œuvre de mesures visant à protéger les objets concernés est recommandée.

d) Pour les projets de construction situés à l'extérieur du périmètre concerné par la carte de dangers, il y a lieu de se référer à la carte indicative des dangers. Si elle signale l'existence d'un danger, la menace à laquelle l'objet concerné est exposé sera évaluée dans le cadre de la procédure en vue d'obtenir l'autorisation de construire. Les mesures visant à protéger les objets concernés sont obligatoires.

Les nouvelles constructions peuvent souvent être protégées en plaçant le rez-de-chaussée en position surélevée. L'insertion de la disposition suivante dans le règlement de construction permet d'appliquer cette mesure (exemple du canton de Nidwald):

Lorsque, pour des raisons de protection contre les dangers, le rez-de-chaussée doit être placé à une telle hauteur au-dessus du terrain naturel que le sous-sol compte pour un étage complet, le conseil communal peut augmenter d'une unité le nombre maximum d'étages complets autorisés.

Au voisinage des lacs, la mise en œuvre de mesures de protection des objets peut être imposée en fixant dans le règlement de construction une hauteur d'inondation à prendre en compte pour tous les bâtiments.

1 Les réglementations relatives aux projets de construction en zone de danger diffèrent d'un canton à l'autre. Veuillez vous renseigner auprès de l'établissement d'assurance de votre canton (ECA) avant d'établir votre projet.

Etape	Maître de l'ouvrage	Auteur du projet	Spécialiste des dangers naturels	Autorité en charge de la construction	Assurance des bâtiments	
Etablissement du projet	Avant-projet	Définit sa vision du projet	Consulte le plan de zone et le règlement de construction	Renseigne sur les documents existants utiles pour déterminer le danger		
		Fait réaliser une expertise spécifique en cas de manque d'informations concernant les dangers	Consulte les cartes de dangers / intensités et le rapport; contrôle si d'autres mesures sont prévues ou en cours d'exécution	Explique si nécessaire les résultats de la carte de dangers ou réalise une expertise spécifique en cas de manque d'informations concernant les dangers	Conseille l'auteur du projet pour la prévention des dommages causés par les forces de la nature	
		Définit les objectifs de protection pour chaque pièce et local du bâtiment dans le cadre de la convention d'utilisation	Etablit la convention d'utilisation avec le maître de l'ouvrage, choisit le concept de la structure et définit la base du projet	Renseigne si nécessaire au sujet de mesures de protection des objets qui ont fait leurs preuves		
	Projet		Identifie les situations de danger et détermine les sollicitations			
		Choisit la variante de projet définitive	Détermine l'agencement définitif du bâtiment et des alentours ainsi que les mesures de protection de l'objet			
			Procède au dimensionnement en vérifiant la sécurité structurale et contrôle l'aptitude au service			
			Déclare le degré de protection contre les dangers naturels atteint à l'autorité en charge de la construction et à l'établissement d'assurance des bâtiments	Assiste si nécessaire l'autorité en charge de la construction dans son examen du projet	Examine le projet sous l'angle des mesures prévues pour protéger l'objet	Conseille l'autorité en charge de la construction pour la prévention des dommages causés par les forces de la nature
Autorisation de construire				Octroie l'autorisation de construire, en l'assortissant éventuellement de conditions complémentaires	Peut signaler une exclusion de l'assurance (diffère selon le canton)	

Etape	Maître de l'ouvrage	Auteur du projet	Spécialiste des dangers naturels	Autorité en charge de la construction	Assurance des bâtiments
<b>Construction</b>	Examine certains points	Suit l'exécution des travaux, veille à la bonne réalisation des mesures de protection		Procède aux contrôles de la construction	Peut contrôler la construction si un objet sensible est concerné (diffère selon le canton)
<b>Réception des travaux</b>	Prend l'ouvrage en charge			Contrôle l'exécution des mesures de protection prescrites	Assure l'ouvrage, en prononçant éventuellement des réserves
<b>Entretien</b>	Contrôle périodiquement le bon fonctionnement des mesures de protection de l'objet ou délègue ce contrôle à un spécialiste				
	Mandate un spécialiste pour remédier aux déficiences repérées				
<b>Sinistre</b>	Prend des mesures de nature à réduire les dommages lors de l'événement				Procède à une expertise des dommages à l'issue de l'événement
<b>Réparation des dommages</b>	Commande les travaux de remise en état et les mesures de protection nécessaires en accord avec l'établissement d'assurance et l'autorité en charge de la construction	Examine la base du projet en ce qui concerne le concept de protection retenu, adapte éventuellement celui-ci et conçoit les mesures de remise en état et de protection de l'objet	Contrôle la carte de dangers existante ou procède à une expertise spécifique en cas de manque d'informations concernant les dangers	Définit les mesures de protection de l'objet qu'il y a lieu de prendre	Conseille l'auteur du projet pour la prévention des dommages causés par les forces de la nature

1

2

3

4

5

6

7



1

2

3

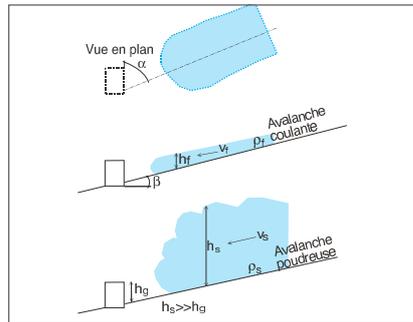
4

5

6

7

## 1 Notations



$h_n$  [m] Epaisseur de la neige déposée naturellement  
 $h_f$  [m] Hauteur d'écoulement de l'avalanche coulante  
 $h_s$  [m] Hauteur d'écoulement de l'avalanche poudreuse  
 $h_{\text{stau}}$  [m] Hauteur de retenue de l'avalanche coulante  
 $v_f$  [m/s] Vitesse de l'avalanche coulante  
 $v_s$  [m/s] Vitesse de l'avalanche poudreuse  
 $g$  [m/s<sup>2</sup>] Accélération gravitationnelle (10 m/s<sup>2</sup>)  
 $h$  [m] Epaisseur de la paroi en béton armé  
 $l_s$  [m] Portée de la paroi en béton armé  
 $\rho_n$  [t/m<sup>3</sup>] Densité de la neige déposée naturellement  
 $\rho_a$  [t/m<sup>3</sup>] Densité de la neige déposée par l'avalanche  
 $\rho_f$  [t/m<sup>3</sup>] Densité de l'avalanche coulante  
 $\rho_s$  [t/m<sup>3</sup>] Densité de l'avalanche poudreuse  
 $h_g$  [m] Hauteur du bâtiment

$m$  [t] Masse d'une charge concentrée

$\alpha$  [°] Angle de déviation  
 $\beta$  [°] Déclivité de la pente  
 $\gamma$  [°] Angle d'ouverture de l'étrave  
 $\delta$  [°] Angle de déviation par un toit-terrain dans le plan vertical  
 $l_u$  [m] Longueur du segment de déviation par un toit-terrain  
 $q_n$  [kN/m<sup>2</sup>] Pression exercée par la neige déposée naturellement  
 $q_f$  [kN/m<sup>2</sup>] Pression exercée par l'avalanche coulante  
 $q_s$  [kN/m<sup>2</sup>] Pression exercée par l'avalanche poudreuse  
 $q_a$  [kN/m<sup>2</sup>] Pression exercée par la neige déposée par l'avalanche  
 $q_u$  [kN/m<sup>2</sup>] Pression due à la déviation par un toit-terrain dans le plan vertical  
 $q_k$  [kN/m<sup>2</sup>] Pression due au glissement et à la reptation de la neige  
 $q_{x,r}$  [kN/m<sup>2</sup>] Frottement spécifique  
 $q_e$  [kN/m<sup>2</sup>] Pression statique de remplacement due à une charge concentrée (choc)  
 $c_d$  [-] Coefficient de résistance  
 $\mu$  [-] Coefficient de frottement  
 $\lambda$  [-] Coefficient de hauteur d'accumulation  
 $A$  [m<sup>2</sup>] Surface d'impact d'une charge concentrée  
 $N$  [-] Facteur de glissement  
 $K$  [-] Facteur de reptation  
 $Q_e$  [kN] Force statique de remplacement due à une charge concentrée (choc)

## 2

## 3

## 4

## 5

## Caractérisation

## 6

## 7 Paramètres d'intensité pour le dimensionnement

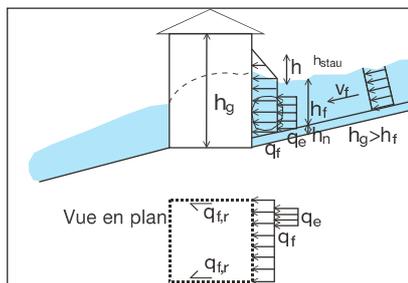
Dans la zone de dépôt, les avalanches coulantes ralentissent en s'étalant sur un terrain de déclivité décroissante. La vitesse passe sous les 10 m/s, tandis que la hauteur de l'écoulement est typiquement de 2 à 10 m. La hauteur d'écoulement des avalanches poudreuses atteint

souvent plus de 50 m dans la zone de dépôt. Elles entraînent de gros blocs de neige dans la tranche inférieure, de 1 à 5 m d'épaisseur, nommée « couche de saltation ». Il y règne de ce fait des forces du même ordre de grandeur que dans les avalanches coulantes.

Pour dimensionner les mesures visant à protéger des objets, il faut disposer de données concernant la hauteur d'écoulement, la vitesse et la densité des avalanches coulantes. Au lieu de la vitesse, il est aussi possible de se baser sur la pression exercée sur un grand obstacle plan disposé perpendiculairement à la direction d'écoulement.

Pour les avalanches poudreuses, le dimensionnement ne nécessite qu'une valeur indicative concernant le souffle auquel il faut s'attendre. Ces données peuvent être tirées des cartes d'intensité et du rapport technique. Si les données concernant les intensités font défaut, elles seront déterminées par un spécialiste des dangers naturels.

## Situation de danger 1

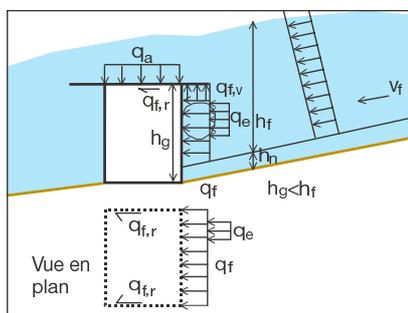


*Une avalanche coulante contourne un bâtiment rectangulaire*

L'avalanche coulante percute la façade frontale du bâtiment. Le choc provoque une retenue de hauteur  $h_{\text{stau}}$ , dont le cumul avec la hauteur d'écoulement  $h_f$  et l'épaisseur de la neige déposée naturellement  $h_n$  ne dépasse pas la hauteur du bâtiment. La toiture ne subit donc aucune action directe.

L'action principale est la pression  $q_f$  exercée sur la paroi exposée. Elle est influencée par la forme du bâtiment, la densité de la neige et la vitesse de l'avalanche. On admet que cette vitesse est constante sur toute la hauteur de l'avalanche. Pour les parois latérales et toutes les parois atteintes obliquement, on appliquera une pression réduite en fonction de l'angle d'incidence  $\alpha$ . Ces parois subissent également des contraintes de frottement  $q_{f,r}$ . Si l'on s'attend à ce que l'avalanche entraîne des blocs ou des troncs d'arbre, ce phénomène est pris en compte en appliquant une pression statique de remplacement  $q_e$ .

## Situation de danger 2

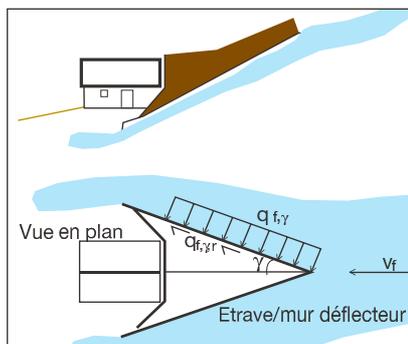


*Une avalanche coulante submerge un bâtiment rectangulaire*

La hauteur d'écoulement  $h_f$  de l'avalanche est supérieure à celle du bâtiment  $h_g$ . Il faut prendre en

compte la pression appliquée sur les parois  $q_f$  et celle qui s'exerce de bas en haut sur les avant-toits  $q_{f,v}$ . Comme l'avalanche submerge le bâtiment, elle soumet la toiture à une charge verticale  $q_a$  qu'il y a lieu d'ajouter à la charge de la neige déposée naturellement  $q_n$ . Les parois et le toit sont en outre le siège de frottements  $q_{f,r}$ . Si l'on s'attend à ce que l'avalanche entraîne des blocs ou des troncs d'arbre, ce phénomène est pris en compte en appliquant une pression statique de remplacement  $q_e$ .

## Situation de danger 3



*Une avalanche coulante contourne un bâtiment précédé d'une étrave*  
Il s'agit d'un cas particulier de la situation de danger 1. L'étrave est

soumise à des pressions exercées par la neige qui la contourne et par les frottements engendrés. La pression  $q_{f,\gamma}$  appliquée sur l'étrave est réduite en fonction de l'angle de déviation  $\gamma$ . Cet angle sera de  $30^\circ$  au maximum. Sinon, il n'y a plus d'effet déflecteur et l'on est en présence d'un choc (situation de danger 1). L'étrave doit en outre avoir une hauteur suffisante. Sinon, il faut également prendre en compte les actions dues à la submersion de l'ouvrage (situation de danger 2). Si l'on s'attend à ce que

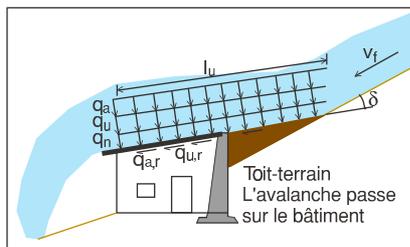
1

l'avalanche entraîne des blocs ou des troncs d'arbre, ce phénomène est pris en compte en appliquant une pression statique de remplacement générée par les charges

concentrées.  
(Cette situation de danger correspond au mode d'action rencontré en présence d'une digue ou d'un mur déflecteur.)

2

## Situation de danger 4



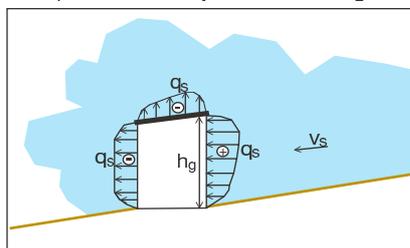
Une avalanche coulante submerge un bâtiment équipé d'un toit-terrain. Il s'agit d'un cas particulier de la situation de danger 2. Le toit situé au niveau du terrain subit une charge due à l'avalanche  $q_a$  et à la neige déposée naturellement  $q_n$ , à laquelle il faut ajouter la charge

occasionnée par la déviation de l'avalanche  $q_u$ . Les sollicitations résultent de forces normales et tangentielles (frottements). Pour les parois latérales et les parois éventuellement atteintes obliquement, on appliquera une pression réduite en fonction de l'angle d'incidence  $\alpha$ . Les contraintes de frottement seront également prises en compte. (Cette situation de danger correspond au mode d'action rencontré en présence d'une galerie paravalanche.)

3

4

## Situation de danger 5

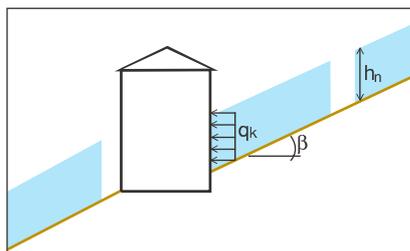


Une avalanche poudreuse atteint un bâtiment

L'action exercée par une avalanche poudreuse sur un bâtiment est comparable à l'action due au vent. On appliquera la même approche que celle décrite dans la norme SIA 261, chiffre 6, pour le vent.

5

## Situation de danger 6



Un phénomène de glissement et de reptation agit sur un bâtiment

Le glissement et la reptation de la neige agissent sur la façade frontale du bâtiment en y exerçant une pression  $q_k$ . Cette action dépend principalement de la densité de la neige, de la déclivité et de l'exposition de la pente, de la couverture du sol et de l'épaisseur du manteau neigeux.

6

7

Hauteur de retenue de l'avalanche coulante

Dans le cas où une avalanche coulante percute un ouvrage, la hauteur de retenue est calculée comme suit:

$$h_{\text{stau}} = (v_f^2) / (2 * g * \lambda) \text{ [m]}$$

*Hauteur de retenue d'une avalanche coulante*

$\lambda$  dépend de la nature de la neige de l'avalanche:

$$\lambda = 1.5 \quad [-]$$

*Avalanche de neige légère, sèche*

$$2 \leq \lambda \leq 3 \quad [-]$$

*Avalanche dense*

Pression exercée par l'avalanche coulante et l'avalanche poudreuse

La pression statique exercée par la contrainte dynamique dépend de la vitesse de l'avalanche, de sa densité et de la forme de l'ouvrage contourné, exprimée par le coefficient de résistance  $c_d$ .

$$q_f = 0.5 * c_d * \rho_f * v_f^2 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

*Pression exercée par une avalanche coulante*

Pour les constructions de base rectangulaire touchées par une avalanche coulante, la valeur de  $c_d$  est généralement comprise entre 2 et 3;

$$\text{avec } \rho_f = 0.3 \text{ [t/m}^3\text{]}$$

*Densité d'une avalanche coulante (valeur indicative)*

Exemple:

une avalanche coulante de vitesse  $v_f = 10 \text{ m/s}$  exerce sur un grand obstacle plan perpendiculaire à la direction d'écoulement une pression

$$q_f = 0.5 * 2 * 0.3 * 100 = 30 \text{ kN/m}^2.$$

Pour les surfaces non perpendiculaires à la direction d'écoulement,



Action due à l'avalanche poudreuse

on tiendra compte de l'angle de déviation  $\alpha$ :

$$q_{f,\alpha} = q_f * \sin^2 \alpha \quad \text{[kN/m}^2\text{]}$$

*Pression en cas d'incidence oblique*

Pour les parois latérales parallèles à la direction d'écoulement, on calculera la pression de l'avalanche correspondant à un angle de déviation des masses de neige  $\alpha = \pm 20^\circ$ .

Le choc contre les parois peut provoquer des forces verticales dirigées vers le haut. Elles agissent par exemple sur les avant-toits et les dalles des balcons, et sont calculées comme suit:

$$q_{f,v} = q_f * 0.4 \quad \text{[kN/m}^2\text{]}$$

*Pression exercée de bas en haut sur les parties saillantes du bâtiment*

Pour les avalanches poudreuses, on peut utiliser les valeurs  $c_d$  selon la norme SIA 261, chiffre 6 (vent), en considérant que  $q_d$  décrit la pression due au souffle. Comme la densité de l'avalanche poudreuse est supérieure à celle de l'air, il y a lieu d'augmenter l'effet du souffle en conséquence. On peut admettre en simplifiant que la pression statique générée par le souffle d'une avalanche poudreuse vaut approximativement:

$$q_s = 3 - 5 \quad \text{[kN/m}^2\text{]}$$

*Pression due au souffle d'une avalanche poudreuse (valeur indicative)*

La pression générée par le souffle avant-coureur d'une avalanche poudreuse est souvent surestimée. Elle se monte au maximum à quelque 5 kN/m<sup>2</sup>.

1 Charge verticale

La charge due à la neige déposée naturellement vaut:

$$q_n = h_n * \rho_n * g \quad [\text{kN/m}^2]$$

Charge due à la neige déposée naturellement

avec  $\rho_n = 0.4 \quad [\text{t/m}^3]$   
 Densité de la neige déposée naturellement (valeur indicative)

La charge due à la neige déposée par une avalanche sur un bâtiment vaut:

$$q_a = (h_f - h_g) * \rho_a * g \quad [\text{kN/m}^2]$$

Charge due à la neige déposée par une avalanche

avec  $\rho_a = 0.5 \quad [\text{t/m}^3]$   
 Densité de la neige déposée par une avalanche (valeur indicative)

2 Déviation verticale

Pression  $q_u$  due à la déviation de l'avalanche dans le plan vertical (situation de danger 4):

La pression statique due à la déviation dans le plan vertical par un toit-terrain ou un autre ouvrage similaire vaut:

$$q_u = (\rho_f * h_f * v_f^2 * \sin \delta) / (l_u) \quad [\text{kN/m}^2]$$

Pression générée par la déviation

3 Frottement

Le frottement est pris en compte par l'entremise d'un coefficient de frottement  $\mu$ . Il vaut:

- $\mu = 0.3 \quad [-]$   
Interface neige / neige
- $\mu = 0.3 \quad [-]$   
Interface neige / béton
- $\mu = 0.4 \quad [-]$

Interface neige / sol grossier ou surface rugueuse

Le frottement spécifique parallèle à la surface  $q_{x,r}$  est calculé à partir de la pression exercée perpendiculairement à la surface  $q_x$  en appliquant la formule suivante:

$$q_{x,r} = \mu * q_x \quad [\text{kN/m}^2]$$

Frottement spécifique

4 Force de choc due à des charges concentrées

Si l'avalanche peut entraîner des troncs d'arbre ou de gros blocs, il faut ajouter à la pression exercée par la neige la force de choc due à ces charges concentrées.

En appliquant les mêmes hypothèses qu'au chapitre consacré aux chutes de pierres, on peut baser les calculs sur les forces statiques de remplacement  $Q_e$  suivantes, qui agissent sur une paroi en béton d'épaisseur  $l_h = 0.3 \text{ m}$  et de portée  $l_s = 2.5 \text{ m}$ :

(hypothèses: rupture ductile, déflexion max. 25 mm, pas d'encastrement)

$$C_k = 0.4, \gamma_Q = 1.0, \gamma_R = 1.0$$

7

Masse du bloc	Vitesse de l'avalanche	Surface d'impact	Force statique de remplacement
m	vf	A	Qe
0.1 t	5 m/s	0.30 m x 0.30 m	20 kN
0.5 t	5 m/s	0.50 m x 0.50 m	100 kN
1.0 t	5 m/s	0.65 m x 0.65 m	200 kN
0.1 t	10 m/s	0.30 m x 0.30 m	80 kN
0.5 t	10 m/s	0.50 m x 0.50 m	400 kN
1.0 t	10 m/s	0.65 m x 0.65 m	800 kN

La force statique de remplacement peut être calculée comme suit pour d'autres épaisseurs  $l_h$  et portées de parois  $l_s$ :

$$Q_e' = (Q_e * 2.5 * l_h) / (0.3 * l_s)$$

On admet que cette charge concentrée agit simultanément avec la pression  $q_f$  exercée par l'avalanche coulante. Applicable à n'importe quel endroit sur la hauteur de l'écoulement, elle est répartie uniformément sur la surface d'impact

A:

$$q_e = Q_e / A \quad [\text{kN/m}^2]$$

*Pression statique de remplacement due à une charge concentrée (choc)*

Si la paroi affectée adopte un comportement fragile et non ductile (poinçonnement par la charge concentrée), il y a lieu de prendre en compte une force statique de remplacement plus élevée (cf. chapitre consacré aux chutes de pierres).

Pression due au glissement et à la reptation de la neige

La pression statique due au glissement et à la reptation de la neige vaut:

$$q_k = \rho_n * g * K * N * h_n * 0.5 * \cos\beta \quad [\text{kN/m}^2]$$

*Pression due au glissement et à la reptation*

avec  $K = 0.83 * \sin 2\beta \quad [-]$

Facteur de reptation pour

$$\rho_n = 0.4 \text{ t/m}^3$$

L'épaisseur de la neige peut être déterminée en appliquant les directives de l'OFEFP/WSL de 1990/2000. La pression calculée s'applique aux objets de grande

portée. Les objets de petite taille et la bordure des objets de grande taille peuvent être le siège de forces de bord élevées.

Le facteur de glissement  $N$  dépend de la couverture végétale et de l'exposition du terrain:

Couverture du sol	Exposition WNW-N-ENE	Exposition ENE-S-WNW
Eboulis formé de blocs/ blocs isolés	1.2	1.3
Couverture continue de buissons/ irrégularités du terrain très marquées/ éboulis grossier	1.6	1.8
Couche d'herbe à longue tige/éboulis fin/ irrégularités du terrain peu marquées	2.0	2.4
Couche lisse d'herbe à courte tige/ dalles lisses de roche en place	2.6	3.2

### 1 Intégration dans le terrain



Les bâtiments bien intégrés dans le

terrain sont protégés contre les atteintes directes des avalanches. Ce résultat est obtenu en plaçant le corps du bâtiment en position basse. Cette mesure permet de réduire la surface de la paroi extérieure exposée aux avalanches qui doit être protégée.

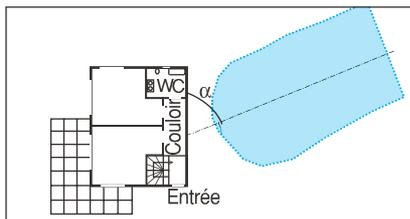
### 2 Forme du bâtiment



La forme du bâtiment détermine les pressions effectivement appliquées contre les parois extérieures touchées. Il est judicieux de présenter des configurations en forme de coin, ou du moins des formes

incurvées, au courant principal des avalanches. En revanche, l'effet des angles saillants et des éléments convexes, tels que cheminées ou encorbellements, est très défavorable. On veillera en outre à ce qu'aucune conduite (chéneau, conduit d'aération de citerne, etc.) ne se trouve sur la façade extérieure directement touchée. Elle serait endommagée ou arrachée sous le choc de l'avalanche.

### 3 Concept d'utilisation des espaces intérieurs



Une utilisation judicieuse des es-

paces intérieurs permet de réduire le risque encouru par les personnes séjournant dans le bâtiment. On disposera des pièces généralement occupées pour de brèves durées, telles que couloirs de liaison ou salles d'eau, au voisinage de la paroi extérieure directement menacée.

### 4 Position des ouvertures dans le plan du bâtiment

Les ouvertures pratiquées dans le bâtiment, telles que portes ou fenêtres, sont les points les plus vulnérables vis-à-vis de l'action des avalanches. C'est pourquoi il faut éviter de placer des fenêtres dans la paroi extérieure exposée aux avalanches, ou sinon leur conférer une très petite taille. De telles ouvertures doivent être

renforcées dans tous les cas (cf. ci-dessous). Les entrées situées sur le côté exposé aux avalanches ne peuvent être autorisées qu'exceptionnellement, pour autant que le motif de cet agencement soit bien fondé et qu'elles soient protégées en permanence par des mesures adéquates.

### 5 Concept d'utilisation de l'espace extérieur



Les utilisations de l'espace extérieur impliquant un séjour prolongé seront cantonnées dans les secteurs protégés par le bâtiment. C'est pourquoi on placera les balcons et les terrasses dans l'espace à l'abri des avalanches. On veillera également à ce que les routes et chemins d'accès au bâtiment empruntent des passages protégés.

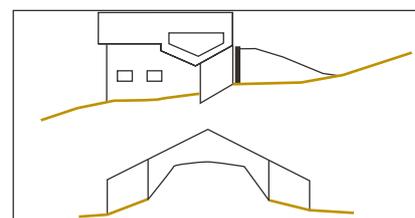
Tous les éléments porteurs susceptibles d'être influencés par une avalanche doivent être dimensionnés pour résister aux forces de pression et de frottement, ainsi qu'aux forces verticales dirigées vers le haut et vers le bas.

### Renforcement des parois extérieures et pose d'un remblai



Les parois extérieures concernées doivent être conçues en fonction de la pression et des frottements engendrés par l'avalanche. Il faut habituellement les renforcer considérablement pour satisfaire à cette exigence (détails dans le chapitre consacré aux chutes de pierres). En général, l'ampleur des frottements ne permet pas de revêtir les façades, par exemple de bardeaux en bois ou en plastique. Plutôt que de renforcer les parois latérales, il est aussi possible de construire un

mur en L devant elles. La surface de la paroi extérieure directement touchée peut être réduite en aménageant un remblai. La pression générée par l'avalanche dans la zone d'influence du remblai sera réduite, mais il faudra prendre en compte le surcroît de pression dû à la poussée des terres.



### Protection des ouvertures



Les portes et les fenêtres exposées aux avalanches doivent être conçues en fonction de la pression à laquelle elles seront soumises. Les portes seront fixées à l'extérieur. La charge appliquée sur les fenêtres doit pouvoir être transmise de la vitre au cadre et du cadre à la construction qui l'entoure. Pour des pressions faibles (avalanches poudreuses), l'utilisation de verre partiellement précontraint permet de réaliser des constructions élancées. Pour des pressions moyennes à élevées (avalanches coulantes), il y a lieu d'opter pour des ouvertures de petite taille. L'action des avalanches peut être réduite en appliquant des croisillons, des plaques défectrices ou des palplanches. Il est absolument nécessaire de prendre de telles mesures s'il faut s'attendre à des chocs dus à des charges concentrées (blocs, troncs d'arbre).

© 2005 VKF/AEAI

1

La fonction protectrice des volets, des stores et des écrans de protection doit être signalée par une indication apposée sur la fenêtre, enjoignant de les fermer en cas de danger immédiat.

Le tableau suivant donne une vue d'ensemble des verres recommandés en précisant leur épaisseur minimale et les dimensions qui conviennent (source: Institut suisse du verre dans le bâtiment, Zurich):

2

Verre simple tenu sur les 4 côtés	Pression de l'avalanche poudreuse	
Dimensions	$q_s = 3 \text{ kN/m}^2$	$q_s = 5 \text{ kN/m}^2$
100 x 100 cm	VSF en VPP de 2x5 mm	VSF en VPP de 2x5 mm
120 x 100 cm	VSF en VPP de 2x5 mm	VSF en VPP de 2x6 mm
150 x 100 cm	VSF en VPP de 2x6 mm	VSF en VPP de 2x8 mm
150 x 60 cm	VSF en VPP de 2x4 mm	VSF en VPP de 2x5 mm
Verre simple tenu sur les 4 côtés	Pression de l'avalanche coulante	
Dimensions	$q_f = 10 \text{ kN/m}^2$	$q_f = 30 \text{ kN/m}^2$
30 x 30 cm	VSF en VF de 2x4 mm	VSF en VF de 2x6 mm
	VSF en VPP de 2x4 mm	VSF en VPP de 2x5 mm
60 x 60 cm	VSF en VF de 2x6 mm	VSF en VF de 2x12 mm
	VSF en VPP de 2x5 mm	VSF en VPP de 2x8 mm

3

VSF: verre de sécurité feuilleté selon la norme EN 12543, 2<sup>e</sup> partie

VF (verre flotté): verre à vitre selon la norme EN 572, 2<sup>e</sup> partie

VPP: verre partiellement précontraint selon la norme EN 1863

S'il est fait usage de verre isolant, le vitrage extérieur devrait être dimensionné comme le verre simple d'après le tableau ci-dessus et être couplé avec un vitrage intérieur épais de 8 mm au minimum. Pour le reste, on se référera aux normes autrichiennes ÖNORM B 5301 et B 5302 (Lawinenschutzfenster und -türen).

4

## Renforcement et exécution du toit

5



des parois latérales, pour autant qu'ils soient suffisamment protégés. Les chevrons et les pannes de ces avant-toits latéraux doivent être ancrés dans la maçonnerie.

S'il faut s'attendre à ce que le toit soit submergé en tout ou partie (situation de danger 2), l'ensemble de la toiture doit être dimensionné pour résister aux contraintes générées par les pressions, frottements et charges appliqués. Dans ce cas, il y a lieu d'examiner s'il n'est pas plus judicieux de prévoir un toit-terrain (cf. ci-après).

6



Si le danger est dû à une avalanche poudreuse, il faut éviter les avant-toits ou les protéger par un coffrage. On choisira des tuiles aussi lourdes que possible ou des modes d'accrochage capables de résister aux surpressions et aux sous-pressions.

7

On évitera de placer des avant-toits du côté amont s'il faut s'attendre à ce que l'avalanche exerce une action verticale dirigée vers le haut (situation de danger 2). Le toit sera noyé dans la paroi exposée aux avalanches (photos). Les avant-toits ne sont autorisés qu'au-dessus

Certaines mesures à effet d'écran peuvent exercer une influence déterminante sur la propagation des phénomènes dangereux. Des mesures de ce type ne peuvent être appliquées que si leur mise en œuvre ne provoque aucune

augmentation de la menace pesant sur les objets voisins.

Le symbole  attire l'attention sur ce problème.

## Digue



### a) Digue de retenue

On peut ériger une digue de retenue pour protéger un objet contre des glissements de neige ou de petites avalanches. Lorsqu'il s'agit de contrer de grandes avalanches dans leur zone de dépôt, la digue est généralement mise en œuvre en combinaison avec des ouvrages de freinage, tels que tas freineurs. Une digue de retenue doit être en mesure d'arrêter l'intégralité d'une avalanche, voire de plusieurs le cas échéant. Sa hauteur sera donc supérieure au cumul de l'épaisseur de la neige déposée naturellement, de la hauteur d'écoulement de l'avalanche et de sa hauteur dynamique. On s'assurera également que ce type de digue dispose d'une capacité suffisante pour contenir le volume de l'avalanche. Les calculs de stabilité de la digue se baseront sur la pression attendue et viseront

à éviter tout glissement de matériaux constituant l'ouvrage.

### b) Digue de déviation

La construction d'une digue de déviation permet d'infléchir la trajectoire de l'avalanche dans une direction souhaitée. Le coût des digues générant une déflexion comprise entre 20° et 30° est encore raisonnable. Si l'angle de déviation est supérieur, il faut construire un ouvrage de grande hauteur et il n'est pas sûr que l'avalanche puisse encore s'écouler. Les digues et murs de déviation visant à protéger des objets sont principalement mis en œuvre en bordure de localités. La hauteur de la digue de déviation est calculée comme celle de la digue de retenue, la vitesse déterminante étant sa composante perpendiculaire à l'axe de l'ouvrage.

## Toit-terrain



On nomme toit-terrain une construction dont le toit est raccordé sans discontinuité au terrain naturel ou à un remblai du côté amont. Ainsi, l'avalanche passe par-dessus le bâtiment. Il y a lieu d'accorder une attention particulière à

l'exécution des extrémités du toit. Une solution spécifique doit être trouvée pour les cheminées (p. ex. construction légère amovible). Les sollicitations statiques équivalentes agissant sur la construction sont décrites dans l'exposé de la situation de danger 4. Les parois latérales doivent être dimensionnées pour résister à la pression et aux frottements, à moins qu'elles ne soient reliées elles aussi au terrain environnant sans discontinuité.

## 1 Etrave →



## 2



## 3

## 4

## 5

L'étrave permet de protéger un objet tel que bâtiment ou pylône. Elle est érigée contre l'ouvrage menacé ou à proximité immédiate de celui-ci. Elle a pour effet de scinder la masse de neige et de l'acheminer de part et d'autre de l'objet à protéger. Son angle d'ouverture ne doit pas dépasser  $60^\circ$ . Les sollicitations statiques équivalentes qu'elle subit sont décrites dans l'exposé de la situation de danger 3. L'étrave doit être suffisamment haute pour ne pas être submergée. Ce paramètre

sera calculé en tenant compte de l'épaisseur de la neige déposée naturellement et de la hauteur d'écoulement de l'avalanche. Lorsqu'une étrave se prolonge le long d'un objet menacé sous la forme de murs en L, il n'est pas nécessaire d'appliquer d'autres mesures sur l'objet lui-même. Sinon, il y a lieu de prendre en considération les actions exercées habituellement par la pression et par les frottements sur les parois latérales.

6 Mesures de protection  
contre les glissements  
de neige

## 7

On peut empêcher, ou du moins ralentir, le glissement et la reptation de la neige en augmentant la rugosité du sol. Ce résultat est obtenu au moyen de banquettes, seuils ancrés, pieux ou trépieds. Ces mesures ont pour effet d'améliorer l'imbrication entre le manteau neigeux et le sol.



Combinaisons de mesures

Cette section présente des combinaisons de mesures envisageables dans chaque situation de danger, pour les constructions existantes et pour les nouvelles. Seule la combinaison des mesures exposées – qui ont trait à la conception, au

renforcement et à l'effet d'écran – permet de réduire efficacement le risque.

Combinaison de mesures	Situation de danger	Conception					Renforcement Coffrage			Effet d'écran Protection contre les glissements		
		Intégration dans le terrain	Forme du bâtiment	Concept d'utilisation des espaces intérieurs	Position des ouvertures	Concept d'utilisation de l'espace extérieur	Parois extérieures	Ouvertures	Toit	Digue	Etrave	Toit-terrain
<b>Construction existante</b>												
A	1/6					●	●	●				
B	1/6							●	●			
C	2					●	●	●	●			
D	3/6			(●)		●				●		
E	5							●	●			
F	6							●				●
<b>Nouvelle construction</b>												
G	1/6	●	●	●	●	●	●	●				
H	1/6				●	●			●			
I	2	●	●	●	●	●	●	●	●			
J	3/6	●	●	(●)		●				●		
K	4	●		●		●	●		●		●	
L	5				●			●	●			
M	6				●	●						●

2

3

4

5

6

7

### 1 Combinaison de mesures A

Cette combinaison applicable aux constructions existantes comprend un renforcement de l'enveloppe du bâtiment et des ouvertures concernées. Les ouvertures de trop grande taille, qu'on peut difficile-

ment renforcer suffisamment, sont supprimées. Il y a lieu de contrôler l'utilisation des espaces extérieurs en fonction de leur emplacement.

### 2 Combinaison de mesures B

Si le danger est généré seulement par des glissements de neige ou par de petites avalanches, une digue de retenue est en mesure de protéger la construction existante contre l'action directe de ces

phénomènes. Il y a lieu de renforcer les ouvertures si l'efficacité de la digue ne peut pas être évaluée avec une sécurité suffisante.

### 3 Combinaison de mesures C

Il est difficile de protéger une construction existante menacée selon la situation de danger 2 en appliquant seulement des mesures de renforcement. La meilleure solution

consiste à renforcer et adapter l'enveloppe, les ouvertures et le toit à l'occasion d'une transformation totale du bâtiment.

### 4 Combinaison de mesures D

L'étrave est une mesure très efficace et peu onéreuse pour protéger une construction existante. Le bâtiment lui-même ne nécessite pas d'adaptations s'il est séparé de l'étrave par un espace destiné à laisser passer la lumière. Il y a lieu

d'adapter l'utilisation de l'espace extérieur selon la configuration des murs en L.

### 5 Combinaison de mesures E

Les constructions existantes menacées par des avalanches poudreuses peuvent être protégées en agissant sur le toit et sur les ouvertures. Il y a lieu de poser des tuiles lourdes ou de mettre en œuvre un mode de construction peu

vulnérable lorsqu'on rénove le toit. Les ouvertures sont renforcées en appliquant aux fenêtres un mode de construction approprié (verre renforcé, liaisons renforcées entre les vitres et le cadre en maçonnerie).

### 6 Combinaison de mesures F

Si le bâtiment est menacé seulement par le glissement et la reptation de la neige, le danger peut être réduit localement en implantant des pieux ou des trépieds. Les fenêtres ouvertes sur l'amont situées dans

le secteur influencé par le manteau neigeux naturel sont renforcées ou protégées temporairement par des panneaux contre le surcroît de pression de la neige.

### Combinaison de mesures G

Pour les nouvelles constructions, la mise en œuvre de mesures ayant uniquement trait à la conception permet déjà de réduire considérablement le risque encouru par les personnes et par les biens. Le bâtiment est protégé de manière optimale lorsqu'il est intégré dans le terrain et que sa forme et sa configuration sont choisies de manière

à limiter les pressions auxquelles il sera soumis. Il faut éviter de pratiquer des ouvertures dans la paroi extérieure exposée aux avalanches, ou sinon leur conférer une petite taille. On aménagera des locaux utilisés peu intensivement dans ce secteur. Les parois extérieures et les ouvertures nécessitent généralement un mode de construction renforcé.

### Combinaison de mesures H

Si une digue de retenue ou de déviation est érigée aux abords d'une nouvelle construction, les mesures à prendre sur le bâtiment lui-même sont sensiblement réduites. Pour maintenir le risque résiduel à un ni-

veau faible, il faut notamment éviter de pratiquer des ouvertures dans la paroi exposée aux avalanches, ou sinon leur conférer une petite taille.

### Combinaison de mesures I

Si le nouveau bâtiment risque d'être non seulement contourné par l'avalanche, mais aussi submergé par celle-ci, il y a lieu de compléter les mesures selon la combinaison F par une toiture ren-

forcée sans avant-toit. Cette mesure de construction peut s'avérer onéreuse, si bien qu'on lui préférera le cas échéant la combinaison K (toit-terrain).

### Combinaison de mesures J

L'édification d'une étrave représente une mesure très efficace pour protéger les nouvelles constructions. Les adaptations qu'il faut apporter au bâtiment sont mineures s'il subsiste un espace entre

l'étrave et celui-ci. Il est important que la construction soit bien intégrée dans le terrain, de manière à ce qu'aucune paroi extérieure ne dépasse de l'étrave.

### Combinaison de mesures K

La réalisation d'une configuration en forme de toit-terrain est une mesure de protection très efficace, comme l'édification d'une étrave. Mais les interventions sur le bâtiment sont plus importantes. La lumière ne peut plus entrer, en tout cas par la paroi exposée aux avalanches, ou sinon elle doit passer par des puits de lumière spécialement aménagés (p. ex. construction enterrée). Cet état de fait se répercute sur l'utilisation des espaces intérieurs. Il y a lieu de renforcer le toit, afin qu'il puisse

reprendre les forces dynamiques dues à la submersion du bâtiment et les forces statiques générées par les dépôts de neige. La paroi extérieure exposée aux avalanches sera dimensionnée en fonction de la pression statique exercée par le terrain et par la neige. Les parois extérieures non protégées seront calculées pour résister aux effets dynamiques de l'avalanche et aux frottements qu'elle engendre.

### 1 Combinaison de mesures L

Les nouvelles constructions peuvent être protégées efficacement contre les effets des avalanches poudreuses moyennant des adaptations de faible ampleur. On obtient ce résultat en évitant les surfaces vitrées de taille excessive.

L'exécution des surfaces vitrées et des toitures est renforcée de manière à pouvoir résister à la pression de l'air. Il faut éviter que le toit présente des saillies, ou leur conférer la plus petite taille possible (forces de succion).

### 2 Combinaison de mesures M

Les mesures destinées à contenir le glissement de la neige dans la pente en amont du bâtiment (pieux, trépieds) réduisent notablement le danger. Pour améliorer encore la sécurité des nouvelles constructions, on placera les fenêtres ouvertes sur l'amont à une hauteur

suffisante. Les utilisations de l'espace extérieur telles que places de jeu ou terrasses seront concentrées à l'aval du bâtiment.

3

4

5

6

7

1

2



3

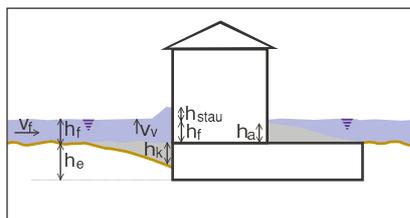
4

5

6

7

## 1 Notations



$h_f$  [m] Hauteur d'inondation

$h_{\text{stau}}$  [m] Hauteur de retenue due à un obstacle

$h_a$  [m] Epaisseur du dépôt de matériaux solides

$h_e$  [m] Profondeur de fondation de l'ouvrage dans le sous-sol

$h_k$  [m] Profondeur d'affouillement contre le bâtiment

$h_u$  [m] Profondeur d'érosion de la berge

$h_r$  [m] Profondeur du plan de glissement de la berge

$v_f$  [m/s] Vitesse d'écoulement

$v_v$  [m/h] Vitesse de montée des eaux

$\rho_{\text{hw}}$  [t/m<sup>3</sup>] Densité de la crue

$\rho_a$  [t/m<sup>3</sup>] Densité du dépôt de matériaux solides

$m$  [t] Masse d'une charge concentrée

$g$  [m/s<sup>2</sup>] Accélération gravitationnelle (10m/s<sup>2</sup>)

$h$  [m] Epaisseur de la paroi en béton armé

$l_s$  [m] Portée de la paroi en béton armé

$q_h$  [kN/m<sup>2</sup>] Pression résultant de la contrainte hydrostatique

$q_f$  [kN/m<sup>2</sup>] Pression résultant de la contrainte hydrodynamique

$q_a$  [kN/m<sup>2</sup>] Pression résultant du dépôt de matériaux solides

$q_e$  [kN/m<sup>2</sup>] Pression statique de remplacement due à une charge concentrée (choc)

$c_d$  [-] Coefficient de résistance de forme

$A$  [m<sup>2</sup>] Surface d'impact d'une charge concentrée

$Q_e$  [kN] Force statique de remplacement due à une charge concentrée (choc)

Autres paramètres importants:

$V$  [h] Délai de préalerte (temps s'écoulant entre la prise de conscience de l'inondation et son occurrence)

$T$  [h] Durée de l'inondation

3

4

## 5 Caractérisation

*Délai de préalerte*

Le délai de préalerte – soit le temps qui s'écoule entre la prise de conscience d'une inondation et son occurrence – est généralement très court en Suisse. S'il se réduit d'ordinaire à quelques minutes pour les torrents, il peut cependant atteindre quelques heures pour les grandes rivières. Seules quelques-unes d'entre elles bénéficient d'un dispositif technique et organisationnel visant à prévenir les personnes concernées. Cela signifie que les mesures de protection temporaires des objets sont largement tributaires de la prise de conscience du danger par les intéressés eux-mêmes.

*Vitesse d'écoulement*

Lorsqu'un terrain de forte déclivité (5-10 %) est inondé, la vitesse d'écoulement atteint 3 à 5 m/s pour une hauteur d'inondation dépassant 0.5 m. De telles vitesses apparaissent également sur les tronçons canalisés (rues). En terrain peu incliné (< 2%) la vitesse tombe généralement sous les 2 m/s.

*Vitesse de montée*

La vitesse de montée décrit la rapidité avec laquelle les eaux montent lors d'une inondation. Ce paramètre détermine le danger pour les personnes séjournant à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments. Il faut notamment s'attendre à une vitesse de montée élevée lorsque l'inondation résulte d'une obstruction du lit ou d'une rupture de digue.

6

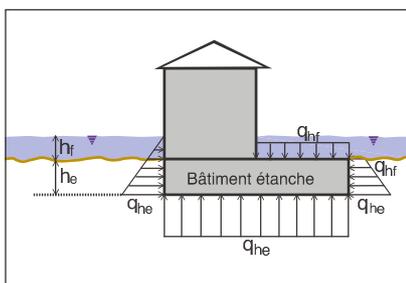
7

Paramètres d'intensité pour le dimensionnement

Pour dimensionner les mesures visant à protéger des objets, il faut disposer de données concernant la hauteur d'inondation et la vitesse d'écoulement, ainsi que l'épaisseur de terrain érodée et l'épaisseur du dépôt de matériaux solides.

Ces données peuvent être tirées des cartes d'intensités. Si les données concernant les intensités font défaut, elles seront déterminées par un spécialiste des dangers naturels.

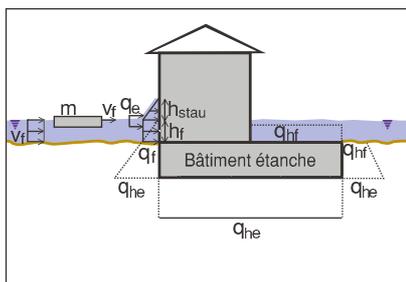
Situation de danger 1



*Inondation statique*  
L'inondation est caractérisée par une vitesse d'écoulement faible

( $v < 1$  m/s). Il n'en résulte aucune contrainte dynamique à prendre en considération. L'action déterminante résulte de la pression hydrostatique  $q_h$  exercée sur l'enveloppe étanche du bâtiment. Celle-ci croît avec la profondeur. On admet que le sol se sature totalement durant l'inondation. La pression hydrostatique exercée sur le radier de l'ouvrage correspond à la poussée d'Archimède.

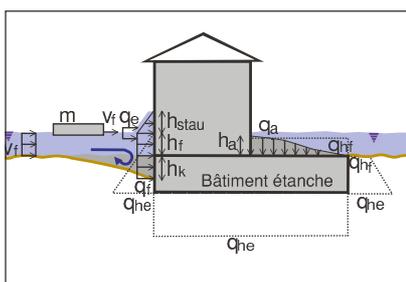
Situation de danger 2



*Inondation dynamique*  
L'inondation est caractérisée par une vitesse d'écoulement moyenne à élevée ( $v > 1$  m/s). Pour déterminer l'action subie par l'ouvrage, on tient compte, outre la force hydrostatique, de la force dynamique exercée par l'écoulement. Il est admis que la vitesse de l'écoulement est uniforme sur toute

la hauteur d'inondation  $h_f$ . Il en résulte une pression uniforme  $q_f$  due à la contrainte hydrodynamique exercée sur la paroi de l'ouvrage exposée au courant. Cette paroi peut également être percutée par des matériaux solides charriés par la crue (troncs d'arbre, matériaux grossiers). La pression statique de remplacement  $q_e$  ainsi engendrée est aussi considérée comme une action. On ne tient pas compte des actions résultant de surpressions ou de sous-pressions locales (suction) dues à des formes de bâtiment particulières. La pression de soulèvement hydrodynamique est également négligée.

Situation de danger 3



*Inondation dynamique avec érosion (affouillement) et alluvionnement*  
L'inondation est caractérisée par une vitesse d'écoulement élevée

( $v > \text{env. } 2$  m/s). La dynamique de cet écoulement provoque l'érosion  $h_k$  (affouillement) et le dépôt  $h_a$  de matériaux solides. Ce phénomène se produit principalement lorsque des ouvrages sont construits le long de chenaux largement canalisés et de déclivité marquée (rues dans les localités). Les actions hydrostatique et hydrodynamique exercées par l'écoulement sont prises en compte (comme dans la situation de danger 2).

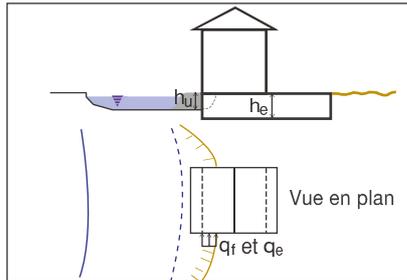
1

Il en va de même pour la force de choc due aux matériaux solides charriés. L'affouillement, qui atteint une profondeur  $h_k$ , peut mettre à jour les fondations du bâtiment, voire les saper. Les dépôts de matériaux solides occasionnent des

surcharges  $q_a$ , qui ont une grande importance pour les ouvrages souterrains (p. ex. garages). Ces phénomènes d'érosion et d'alluvionnement sont pris en compte dans les actions.

2

## Situation de danger 4



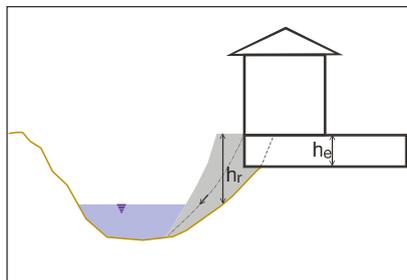
*Déplacement du lit du cours d'eau*  
L'érosion de la berge revêt la forme d'un déplacement du lit du cours d'eau. La berge est érodée jusqu'à une profondeur  $h_u$ . La fondation de l'ouvrage n'est pas menacée, car

sa profondeur  $h_e$  est supérieure à  $h_u$ . Du fait de l'érosion latérale, une partie du bâtiment est touchée directement par l'écoulement dans le chenal. Les actions qu'il subit sont donc la pression occasionnée par l'écoulement  $q_f$  et la pression exercée sur la façade frontale par les chocs dus aux matériaux solides charriés  $q_e$ .

3

4

## Situation de danger 5



*Glissement de la berge*  
L'érosion de la berge revêt la forme d'un glissement de terrain. Fréquemment déclenchés par l'érosion verticale du lit du cours d'eau, ces glissements peuvent avoir une grande extension. Ils sont profonds

ou superficiels selon la topographie et la géologie locales. L'action sur l'ouvrage correspond à celle qui est exercée lorsque le plan de glissement est semi-profond à profond ( $h_r$ ). Les contraintes correspondantes, ainsi que les mesures de protection des objets susceptibles d'être prises, sont traitées dans le chapitre consacré aux glissements de terrain.

Si la crue atteint l'ouvrage, il y a lieu de considérer également les actions correspondant à la situation de danger 4 (déplacement du lit du cours d'eau).

5

6

7

Pression résultant de la contrainte hydrostatatique

La pression hydrostatatique est déterminée comme suit:

$$q_{hf} = \rho_{hw} * g * h_f \quad [\text{kN/m}^2]$$

*Pression à la surface du terrain pour une hauteur d'inondation  $h_f$*

$$q_{he} = \rho_{hw} * g * (h_f + h_e) \quad [\text{kN/m}^2]$$

*Pression au niveau de la fondation du bâtiment pour une hauteur d'inondation  $h_f$*

On appliquera les valeurs indicatives suivantes pour déterminer la densité de la crue:

$$\rho_{hw} = 1.1 \text{ t/m}^3$$

*Densité d'une crue charriant peu de matériaux solides*

$$\rho_{hw} = 1.4 \text{ t/m}^3$$

*Densité d'une crue charriant beaucoup de matériaux solides*

Pression résultant de la contrainte hydro-dynamique

La pression exercée par la contrainte hydrodynamique agissant sur un ouvrage entouré d'eau vaut:

$$q_f = 0.5 * C_d * \rho_{hw} * v_f^2 \quad [\text{kN/m}^2]$$

*Pression sur la paroi exposée au courant*

$C_d$  prend les valeurs indicatives typiques suivantes:

$C_d = 1.25$  à  $1.50$  si: longueur de la paroi exposée / hauteur d'inondation < 40

$C_d = 1.50$  à  $2.00$  si: longueur de la paroi exposée / hauteur d'inondation > 40

Hauteur de retenue

La hauteur de retenue correspond à la surélévation de l'écoulement contre l'ouvrage entouré d'eau.

Elle vaut au maximum:

$$h_{stau} = (v_f^2) / (2 * g)$$

*Hauteur de retenue due à un obstacle*

Profondeur d'affouillement



d'inondation, la granulométrie du sol menacé et la durée de l'inondation. Les bâtiments ne comprenant pas de cave nécessitent un calcul détaillé. Le tableau ci-dessous expose les résultats pour deux cas standard.

La profondeur de l'affouillement susceptible d'affecter un bâtiment menacé d'inondation peut être déterminée de manière détaillée selon Kohli (1998). A cet effet, il faut connaître, outre la vitesse d'écoulement et la hauteur

Pour les bâtiments comprenant une cave, le danger d'affouillement concerne principalement ceux qui sont construits le long du lit d'un cours d'eau (situation de danger 4).

Paramètre	Exemple 1	Exemple 2
Vitesse d'écoulement, $v_f$	2 m/s	0.90 m/s
Hauteur d'inondation, $h_f$	0.5 m	1 m
Durée de l'inondation, $T$	9 h	24 h
Diamètre granulométrique, $d_{50}$	0.02 m	0.008 m
Diamètre granulométrique, $d_{90}$	0.08 m	0.03 m
Profondeur d'affouillement, $h_k$	1.10 m	0.60 m

1 Surcharge due au dépôt de matériaux solides

Les dépôts de matériaux solides génèrent des forces verticales et horizontales dues à la poussée des terres. Celles-ci doivent être prises en compte, si cela n'a pas déjà été fait, en augmentant la valeur de la densité de la crue dans le calcul des forces hydrostatiques. La pres-

sion des terres dans l'axe vertical (surcharge) vaut:

$$q_a = \rho_a * g * h_a \quad [\text{kN/m}^2]$$

*Surcharge due au dépôt de matériaux solides*

La densité de ces matériaux vaut:

$$\rho_a = 2.0 \text{ t/m}^3$$

*Densité du dépôt de matériaux solides (valeur indicative)*

2 Force de choc due à des charges concentrées

Si la crue peut entraîner des blocs ou d'autres matériaux solides, il faut ajouter à la pression résultant des contraintes hydrostatique  $q_h$  et hydrodynamique  $q_f$  la force de choc due à ces charges concentrées.

La force statique de remplacement peut être calculée comme suit pour d'autres épaisseurs  $l_h$  et portées  $l_s$  de parois:

$$Q_e' = (Q_e * 2.5 * l_h) / (0.3 * l_s)$$

Applicable à n'importe quel endroit sur la hauteur d'inondation, cette force statique de remplacement est répartie uniformément sur la surface d'impact A:

$$q_e = Q_e / A \quad [\text{kN/m}^2]$$

3

En appliquant les mêmes hypothèses qu'au chapitre consacré aux chutes de pierres, on peut compter sur les forces statiques de remplacement  $Q_e$  suivantes, qui agissent sur une paroi en béton d'épaisseur  $l_h = 0.3 \text{ m}$  et de portée  $l_s = 2.5 \text{ m}$ : (hypothèses: rupture ductile, déflexion max. 25 mm, pas d'encastrement, prise en compte du soulèvement dû aux blocs,  $C_k = 0.4, \gamma_Q = 1.0, \gamma_R = 1.0$ )

4

Masse du bloc m	Vitesse d'écoulement $v_f$	Surface d'impact A	Force statique de remplacement $Q_e$
0.1 t	2 m/s	0.30 m x 0.30 m	2 kN
0.5 t	2 m/s	0.50 m x 0.50 m	10 kN
0.1 t	4 m/s	0.30 m x 0.30 m	8 kN
0.5 t	4 m/s	0.50 m x 0.50 m	40 kN

5

6

7



## Humidité et souillures



L'humidité et les dépôts entraînent une dépréciation partielle ou totale des aménagements des bâtiments (sols, parois, plafonds), des équipements et des biens mobiliers. Dans certains cas, la structure porteuse peut également être affectée. Le fonctionnement et l'aspect extérieur des éléments touchés sont dégradés à tel point qu'on ne peut plus garantir leur fonction. Les effets de l'humidité se font généralement ressentir au-delà de la cote maximale d'inondation. Les phénomènes de capillarité dans les parois et d'évaporation de l'eau peuvent aussi affecter des parties de bâtiments situées plus haut que cette cote maximale. Toutes les substances, solubles ou non, qui sont entraînées par les eaux provoquent des souillures.

*Effets de l'humidité*

- Dépréciation due à l'absorption d'eau :  
Les produits en bois, papier, textile, gypse, etc., subissent généralement un dommage total, l'absorption d'eau en altérant l'aspect extérieur.
- Courts-circuits dans les installations électriques:  
La présence d'eau provoque des courts-circuits dans les prises qui ne sont pas isolées. L'arc électrique qui en résulte risque de provoquer un incendie.

- Réactions chimiques avec des substances stockées:  
Les substances stockées peuvent réagir au contact de l'eau (incendie, explosion).

*Effets des souillures*

- Dépréciation due à l'absorption de substances odorantes entraînées par l'eau:  
L'eau contaminée par des combustibles liquides ou des matières fécales peut endommager intégralement des objets du seul fait des odeurs qui s'y incrustent.
- Dépréciation due à la pénétration de matières solides:  
Il arrive fréquemment que des particules fines ne puissent plus être retirées des matériaux poreux.
- Dégradation de l'aptitude au fonctionnement d'installations électriques ou mécaniques:  
Les substances solides qui pénètrent dans les appareils électriques ou mécaniques provoquent des dysfonctionnements et ne peuvent souvent pas être retirées à un coût raisonnable.

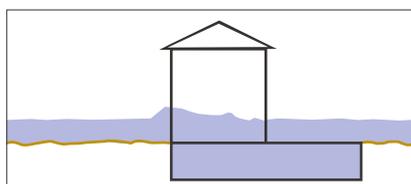
1 Vue d'ensemble  
des mesures

Cette section comprend une vue d'ensemble des mesures possibles. Il y a lieu de distinguer les mesures permanentes et les mesures temporaires, spécialement dans le cas des inondations.

Mesure	Description
Permanente	Mesures ayant un effet permanent sur l'objet concerné. Aucune intervention humaine n'est nécessaire pour garantir la protection de cet objet lors d'un événement.
Temporaire	Mesures planifiées requérant une certaine organisation pour déployer leur efficacité. Leur mise en œuvre est subordonnée à l'existence d'une procédure de préalerte en cas de crue. La protection contre les crues peut être assurée selon trois axes:

2

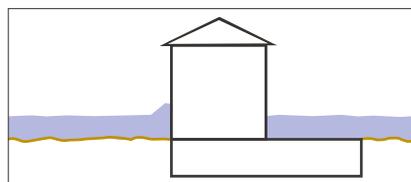
3



*Inondation contrôlée*

– Inondation contrôlée: on accepte délibérément que le bâtiment soit inondé. Les dégâts sont limités en recourant à des matériaux insensibles à l'eau pour l'aménagement intérieur et en utilisant le bâtiment conformément à la situation.

4



*Etanchement*

– Etanchement: le bâtiment est construit de manière étanche sous forme de cuve. Les seuls dégâts possibles sont des souillures de l'enveloppe externe du bâtiment.

5



*Ecran*

– Ecran: l'eau est tenue à l'écart du bâtiment à l'aide de barrières ou en surélevant celui-ci.

6

Concept d'utilisation des  
espaces intérieurs

Le principe de l'inondation contrôlée est principalement appliqué aux bâtiments existants pour lesquels la résistance au soulèvement est problématique.

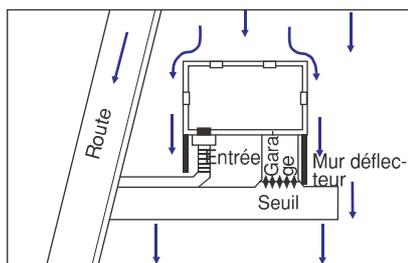
Une utilisation judicieuse des espaces intérieurs permet de réduire considérablement le risque encouru par les personnes et par les biens qui se trouvent dans des bâtiments exposés aux crues. Les sous-sols feront l'objet d'une attention particulière. Le risque pour les personnes est par exemple élevé

lorsque des postes de travail sont aménagés en sous-sol et que la voie d'évacuation correspond au cheminement principal d'entrée de l'eau. Le risque pour les biens est minimisé si les sous-sols sont surtout occupés par des marchandises et des installations insensibles à l'eau.

7

## Position du rez-de-chaussée et des ouvertures

- Hauteur du rez-de-chaussée  
La hauteur du rez-de-chaussée par rapport au terrain environnant joue un rôle important dans la vulnérabilité d'un ouvrage vis-à-vis des inondations. Sa position détermine la hauteur des entrées et par conséquent des principales ouvertures par lesquelles l'eau



peut s'engouffrer. Il est possible d'aménager une rampe pour éviter des escaliers indésirables lorsque le rez-de-chaussée est surélevé. Cette mesure équivaut en fin de compte à placer le bâtiment en position surélevée (cf. section consacrée aux écrans, ci-après).



- Position des entrées  
Si un bâtiment ou un bien-fonds est exposé à l'écoulement d'une crue, les entrées doivent être disposées du côté opposé au courant principal. Ce principe concerne en particulier les ouvrages construits sur des cônes de déjection de torrents. La paroi amont devrait être équipée de fenêtres spécialement protégées sur la hauteur du rez-de-chaussée et ne comporter aucun soupirail ni accès au sous-sol. Les parois extérieures parallèles au courant et opposées à celui-ci sont à l'abri des pressions dynamiques. Ainsi, l'étanchéité des entrées qui s'y trouvent est notablement moins sollicitée.

- Hauteur des ouvertures  
La hauteur des ouvertures telles que soupiroux, conduits de ventilation, fenêtres, introductions de conduites non étanches ou accès au garage joue également un rôle déterminant dans la vulnérabilité d'un ouvrage vis-à-vis des inondations. Les soupiroux et conduits de ventilation de hauteur insuffisante favorisent notablement l'irruption d'eau dans les sous-sols en cas d'inondation.

## Choix des matériaux constituant les aménagements intérieurs (sols, parois et plafonds)

Les planchers subissent des dégâts lorsque les matériaux utilisés absorbent de grandes quantités d'eau, offrent peu de résistance aux milieux légèrement acides ou basiques, ou sont imperméables et empêchent ainsi l'évaporation de

l'eau imprégnant le sol brut. Il faut également s'attendre à des dommages lorsque le matériau d'interface entre le sol brut et le plancher est soluble dans l'eau.

### Sensibilité à l'humidité Type de plancher

Faible	Pierre naturelle, ciment, argile, époxy <sup>1</sup> , résine de mastic <sup>1</sup> , polyuréthane <sup>1</sup> , silicone <sup>1</sup> , caoutchouc
Moyenne	Plaques de céramique <sup>2</sup>
Elevée	Tapis, revêtements en matériaux textiles ou synthétiques, bois, liège, linoléum

<sup>1</sup>: coulé sur place

<sup>2</sup>: avec un mortier résistant aux acides et aux alcalins

Les dégâts aux parois et aux plafonds dépendent des mêmes facteurs que dans le cas des planchers.

**Sensibilité à l'humidité Type de paroi ou de plafond**

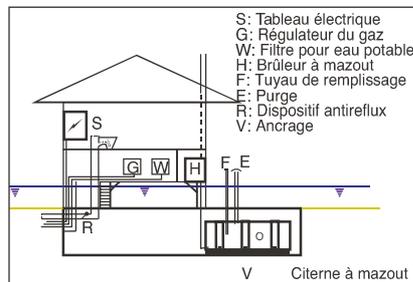
Faible	Béton, pierre naturelle, briques en terre cuite, métal, argile, caoutchouc <sup>1</sup> , verre
Moyenne	Panneaux synthétiques <sup>1</sup>
Elevée	Plâtre, bois, liège, peinture <sup>2</sup> , papier peint, isolation <sup>3</sup>

<sup>1</sup>: avec matériau d'interface insensible à l'eau

<sup>2</sup>: à l'exception des peintures polyester-époxy

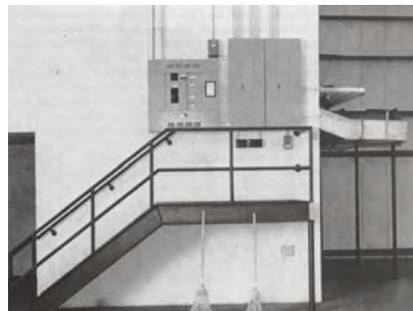
<sup>3</sup>: à l'exception des mousses et des produits poreux fermés

Conception des  
installations  
d'alimentation



*Alimentation en eau potable*

La conduite principale d'alimentation en eau potable est généralement équipée d'un filtre. Celui-ci peut être endommagé ou totalement bouché pendant une inondation, provoquant ainsi une coupure de l'approvisionnement en eau potable. Lorsque le filtre est placé au-dessus de la cote d'inondation, on peut y accéder en permanence pour remédier à d'éventuels dysfonctionnements.



*Alimentation en électricité*

Dans un bâtiment non étanche, l'alimentation en électricité peut être garantie en prenant les mesures suivantes:

- Emplacement de l'interrupteur principal ainsi que des dispositifs de mesure, de distribution et de régulation à un niveau supérieur à la cote d'inondation du bâtiment.

- Séparation des lignes alimentant les parties du bâtiment situées au-dessous et au-dessus de la cote d'inondation.

- Déconnexion automatique des lignes de distribution passant au-dessous de la cote d'inondation lorsque de l'eau s'accumule dans les parties de bâtiments qu'elles parcourent.

Les coupures d'électricité provoquent d'innombrables dommages secondaires, telle la perte de places de travail dans des bâtiments industriels ou artisanaux. Il est donc impératif que les installations situées à l'intérieur des bâtiments affectés soient remises en service aussi rapidement que possible, ce qui est favorisé par la mise en œuvre des mesures préconisées ici.

La présence d'un éclairage de sécurité indépendant du réseau revêt une grande importance, notamment dans les complexes où il faut procéder à une évacuation de personnes et de biens en cas de catastrophe (p. ex. sous-sols d'hôpitaux ou d'exploitations industrielles ou artisanales, garages souterrains, etc.). Les mesures décrites s'appliquent par analogie à l'alimentation en gaz des bâtiments. Leur élaboration peut se référer aux règles techniques de la Société suisse de l'industrie du gaz et des eaux (SSIGE) et à la directive VDI 6004 (VDI 2004).

© 2005 VKF/AEAI

### Ancrage des citernes à mazout

En plaçant les installations de stockage de mazout au-dessus de la cote d'inondation dans les espaces menacés, on garantit leur fonctionnement pendant et après une inondation (si l'alimentation en électricité n'est pas coupée) et on évite les dommages secondaires dus à la dissémination du mazout. Si cet agencement est irréalisable, les mesures de protection se limitent à veiller à ce que le mazout soit stocké dans de bonnes conditions d'étanchéité. La citerne doit être

fixée afin d'éviter qu'elle ne flotte et être suffisamment solide pour résister à la pression de l'eau (flambage). Les conduites entrantes et sortantes seront également fixées. L'extrémité du tuyau de purge de la citerne doit être à un niveau supérieur à la cote d'inondation. La conduite d'introduction du mazout dans le brûleur sera équipée d'un clapet qui se ferme automatiquement si de l'eau envahit le sol de la chaufferie.

### Protection contre le reflux dans les canalisations



Dans les canalisations, la mesure principale consiste à empêcher tout reflux. Différents types de clapets ou de vannes permettent d'éviter que l'intérieur d'un bâtiment soit inondé par de l'eau qui reflue dans le réseau de canalisations. On distingue les dispositifs suivants:

- Clapets antireflux automatiques
- Vannes antireflux manuelles
- Combinaisons de ces deux types

L'avantage du clapet antireflux automatique réside dans le fait qu'il fonctionne indépendamment de

toute intervention humaine. Cette caractéristique est importante, car l'occurrence d'un reflux n'est pas perceptible directement. Il peut également s'avérer judicieux d'installer de tels dispositifs dans des constructions situées hors des zones potentiellement inondables. Des bâtiments peuvent être inondés (à l'intérieur) dans des zones en principe épargnées, en particulier lorsque l'épanchement de l'inondation est entravé par des obstacles. Si l'on doit pouvoir évacuer continuellement des eaux polluées lors d'une inondation (p. ex. hôpitaux, établissements de soins, etc.), il faut aménager un bassin de rétention isolé en parallèle au réseau usuel.

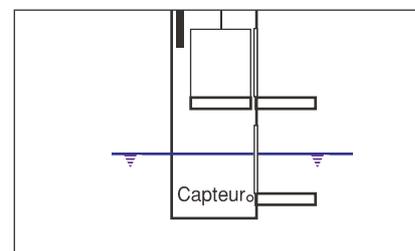
### Voies d'évacuation

Les personnes séjournant dans les parties de bâtiments situées au-dessous de la cote d'inondation doivent pouvoir les quitter en empruntant des escaliers ou des échelles pour gagner les étages

supérieurs. Dans les bâtiments à un étage, il faut pouvoir monter sur le toit.

### Mesures concernant les ascenseurs

Il faut veiller à ce que la position d'arrêt des ascenseurs et des monte-charges se trouve au-dessus de la cote d'inondation. L'accumulation d'eau dans la cage doit déclencher une alarme et stopper l'installation par l'entremise d'un capteur.



1 Protection des  
ouvertures

Mesures permanentes

Parmi les mesures produisant des effets permanents, on mentionnera l'installation de portes et de fenêtres étanches et renforcées. Les portes seront fixées à l'extérieur. La charge appliquée sur les fenêtres sera transmise de la vitre au cadre et du cadre à la construction qui l'entoure.

Le tableau suivant donne une vue d'ensemble des verres recommandés pour résister aux inondations



avec une vitesse d'écoulement faible (situation de danger 1), en précisant les dimensions qui conviennent (source: Institut suisse du verre dans le bâtiment, Zurich):

Verre simple tenu sur les 4 côtés Dimensions hauteur x largeur	Surface de l'eau à 1 m au-dessus de la base de la vitre (BV), soit au niveau de son sommet VF de 15 mm	Surf. de l'eau à 1.5 m de la BV, soit à 0.5 m au-dessus de son sommet VF de 19 mm	Surf. de l'eau à 2.0 m de la BV, soit à 1.0 m au-dessus de son sommet VSF en VF de 2x19 mm
100 x 100 cm	VSF en VF de 2x8 mm	VSF en VF de 2x12 mm	--
100 x 200 cm	VSF en VF de 2x12 mm	--	--

3

4

5

6

7

VF (verre flotté): verre à vitre selon la norme EN 572, 2<sup>e</sup> partie  
VSF: verre de sécurité feuilleté selon la norme EN 12543, 2<sup>e</sup> partie  
S'il est fait usage de verre isolant, le vitrage extérieur devrait être dimensionné comme un verre simple d'après le tableau ci-dessus et être couplé avec un vitrage intérieur épais de 8 mm au minimum.

Lors d'inondations avec une vitesse d'écoulement moyenne à élevée (situations de danger 2 et 3), les fenêtres sont exposées à une pression statique supérieure ainsi qu'aux chocs occasionnés par les charges concentrées (corps flottants). L'action des crues peut être réduite en appliquant des croisillons, des plaques déflectrices ou des palplanches. Les contraintes correspondantes seront traitées selon les recommandations figurant au chapitre consacré aux laves torrentielles.

Mesures temporaires

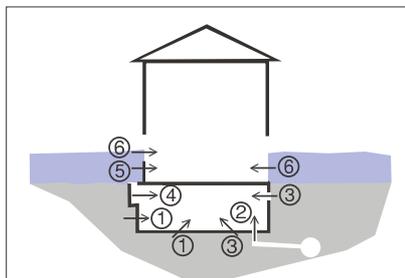
Les ouvertures peuvent être protégées temporairement au moyen

d'écrans en métal ou en bois. Quelques fabricants proposent des solutions standard pour sécuriser les ouvertures des bâtiments existants. Pour les nouvelles constructions, il est possible de trouver une solution satisfaisante au plan architectural en intégrant les écrans de protection dans la façade, juste sous les ouvertures, de sorte qu'ils puissent être levés en cas d'inondation.



Pénétration d'eau dans le bâtiment

L'eau peut pénétrer dans un bâtiment en empruntant les cheminements suivants:



- 1 La nappe phréatique traverse les parois ou le radier de la cave
- 2 L'eau reflue dans le bâtiment par les canalisations
- 3 La nappe phréatique pénètre par des joints ou des raccordements non étanches (introduction de conduites, câbles noyés dans la maçonnerie)

- 4 Les hautes eaux s'écoulent par les soupiraux et les fenêtres de la cave
- 5 Les hautes eaux percolent à travers les parois extérieures
- 6 Les hautes eaux pénètrent par les ouvertures des portes et des fenêtres

Etanchéité de l'enveloppe du bâtiment

L'étanchéité de l'enveloppe du bâtiment vis-à-vis des inondations peut être subdivisée selon trois degrés:

Degré d'étanchéité	Description
Parfaitement étanche	Le bâtiment ou le local concerné est parfaitement étanche à l'eau et aux actions des inondations.
Principalement étanche	Le bâtiment ou le local concerné est principalement étanche. Il est possible que de la vapeur d'eau traverse des parois ou que des quantités d'eau minimales percolent par des fentes. Mais il en résulte tout au plus des accumulations d'eau de quelques centimètres au sol pendant une inondation.
Non étanche	Il entre tant d'eau dans le bâtiment ou le local concerné pendant une inondation que le niveau à l'intérieur est proche de la cote du plan d'eau à l'extérieur du bâtiment.

Les procédés suivants peuvent être appliqués pour rendre l'enveloppe du bâtiment parfaitement étanche:

- Construction étanche en béton, béton étanche
- Construction avec une couche d'étanchéité externe ou interne, couche d'étanchéité bitumée

Ces deux procédés présentent les propriétés suivantes:

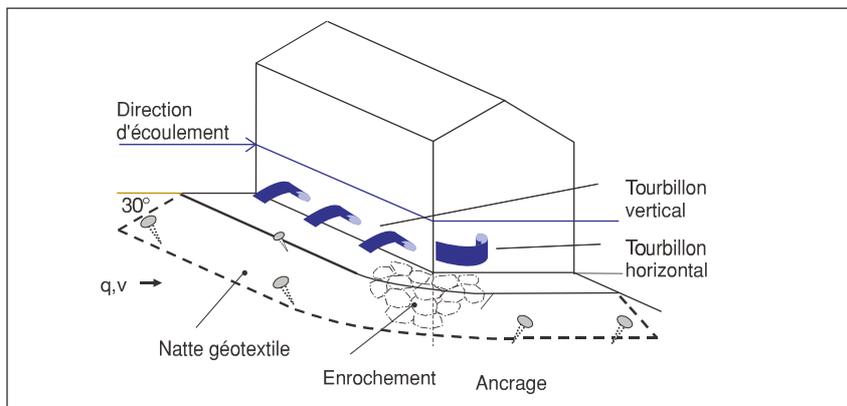
Critère	Feutre bitumé	Béton étanche
Fonction	Etanche	Etanche et porteur
Elasticité	Elevée, pontage des fissures	Faible, risque de fissuration
Etanchéité à la vapeur d'eau	Oui	Non



Pour une plus ample considération, il y a lieu de se référer aux normes SIA 272 (Etanchéité des ouvrages enterrés) et SIA 274 (Etanchéité des joints dans la construction). S'il subsiste un risque résiduel de percolation, celui-ci peut être réduit efficacement en plaçant une pompe immergée dans le sous-sol.

1 Protection des  
fondations contre  
l'affouillement

2



3

L'affouillement est principalement réduit en diminuant l'impact des tourbillons qui se forment le long du bâtiment. L'action des tourbillons horizontaux est contrée au moyen d'ouvrages horizontaux. Une solution souple et bon marché consiste à poser des nattes drainantes en géotextile. Pour contrer l'action des tourbillons verticaux, des protections verticales sont mises

en place aux coins du bâtiment. Dans ce cas, la protection requise contre l'affouillement peut être atteinte au moyen d'un enrochement. L'ouvrage de Kohli (1998) comprend des détails concernant le dimensionnement de ces dispositifs.

4

5

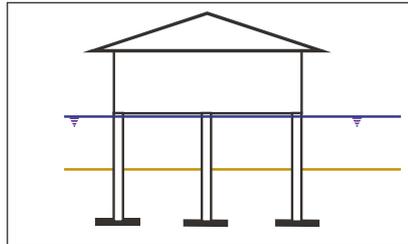
6

7

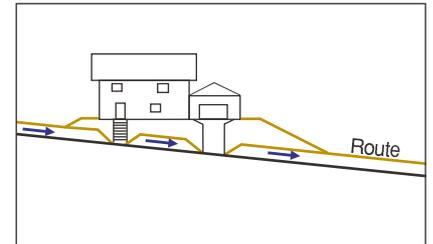
Certaines mesures à effet d'écran peuvent exercer une influence déterminante sur la propagation des phénomènes dangereux. Des mesures de ce type ne peuvent être appliquées que si leur mise en œuvre ne provoque aucune augmen-

tation de la menace pesant sur les objets voisins. Le symbole  attire l'attention sur ce problème.

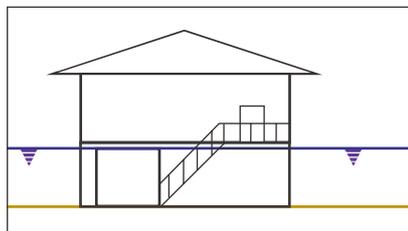
## Position surélevée



Construction sur piliers



Construction sur remblai 



Construction sur murs

Dans de nombreux cas, la mesure la plus avantageuse au plan économique et la plus efficace pour réduire le risque pesant sur un nouveau bâtiment consiste à le construire sur un remblai. En procédant de la sorte, l'objet menacé peut être mis intégralement à l'abri des inondations (exception: accès au bâtiment en position basse). Il y a lieu de protéger le remblai contre l'érosion externe aux endroits où la vitesse d'écoulement est rapide. Lorsque cette mesure est mise en œuvre, il faut veiller à ce que le résultat soit bien intégré dans le paysage.

La construction sur piliers est une mesure de protection efficace, qui laisse en outre une grande liberté de conception. L'espace gagné sous le bâtiment peut servir de parking ou d'espace pour les loisirs. Si l'on recourt à des murs en lieu et place de piliers, on augmente encore les possibilités d'utilisation des volumes situés sous le bâtiment.

## 1 Digue ou mur de protection

2

3

4

5

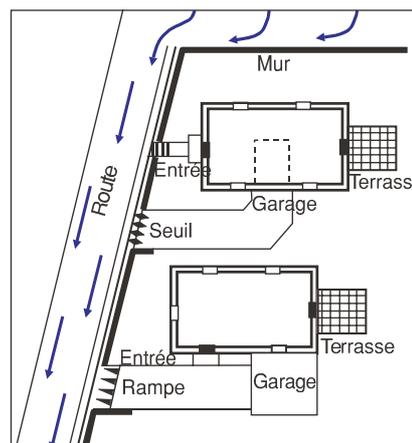
6

7

### Mesures permanentes

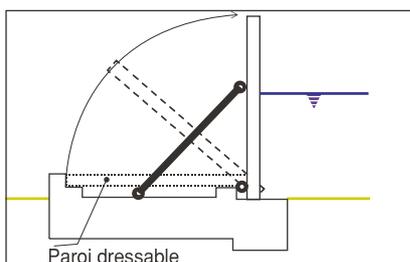
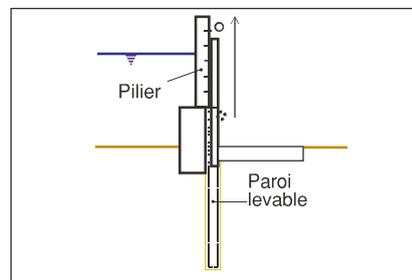
La construction d'une digue ou d'un mur avec rampe d'accès constitue une mesure permanente. Si l'accès emprunte un portail étanche au lieu d'une rampe, il s'agit d'une mesure temporaire. Dans ce cas, il n'est pas certain que la porte soit en position fermée lorsqu'un événement se produit.

Lorsque l'on construit une digue ou un mur, il y a lieu de procéder aux vérifications usuelles concernant la stabilité interne et l'étanchéité ainsi que les phénomènes de renversement, glissement, tassement, érosion externe et interne, et renard hydraulique. L'eau de percolation à travers l'ouvrage et l'eau provenant de fuites sera récupérée dans des puits. Ce point est principalement important dans les régions affectées par des inondations de longue durée.



### Mesures temporaires

On peut prévoir des dispositifs à dresser ou à lever à titre de mesure temporaire. Lorsque le délai de préalerte est suffisamment long, il est aussi possible de mettre en œuvre des mesures d'urgence comprenant des systèmes mobiles de palplanches, des digues de sacs de sable ou des combinaisons de ceux-ci.



Combinaisons de mesures

Cette section présente des combinaisons de mesures envisageables dans chaque situation de danger, pour les constructions existantes et pour les nouvelles. Seule la com-

binaison des mesures exposées – qui ont trait à la conception, à l'étanchéité, au renforcement et à l'effet d'écran – permet de réduire efficacement le risque.

		Conception							Etanchéité Renforcement			Ecrans	
Combinaison de mesures	Situation de danger	Position du rez-de-chaussée et des ouvertures	Concept d'utilisation des espaces intérieurs	Choix des matériaux pour les aménagements intérieurs	Installations d'alimentation en énergie et en eau	Protection contre le reflux dans les canalisations	Ancrage des citernes à mazout	Voies d'évacuation	Ouvertures	Enveloppe du bâtiment	Protection des fondations contre l'affouillement	Position surélevée	Digue / mur de protection
<b>Construction existante</b>													
A	1/2	●				●	●	●					
B	1/2					●	●	●	●				
C	1/2					●		●	●	●			
D	3					●		●	●	●	●		
E	4							●	●	●	●		
F	1/2											●	
G	1/2					●							●
<b>Nouvelle construction</b>													
H	1/2		●	●	●	●	●	●					
I	1/2	●	●			●		●	●	●			
J	1/2/3	●										●	
K	3		●			●		●	●	●	●		
L	1/2/3	●				●							●
M	4	●	●					●	●	●			

### 1 Combinaison de mesures A

Cette combinaison comprend les mesures minimales à appliquer aux constructions existantes (inondation contrôlée). Elle permet d'assurer la sécurité des personnes et d'éviter les dommages secondaires provenant des installations de

stockage de mazout. Elle n'empêche pas que l'intérieur du bâtiment soit inondé, mais les dégâts matériels sont minimisés en adaptant l'utilisation des sous-sols et en y stockant des substances conformément à la situation de danger.

### 2 Combinaison de mesures B

Par rapport à la combinaison A, cette variante prévoit également l'étanchement et le renforcement des ouvertures. Elle empêche l'eau de passer par les entrées, les soupiraux, les conduits d'aération et les fenêtres. L'eau ne peut pénétrer

que par les parties non étanches de l'enveloppe du bâtiment.

### 3 Combinaison de mesures C

L'enveloppe du bâtiment est renforcée et étanchée là où cela s'avère nécessaire. La construction existante, également soumise aux mesures usuelles (selon la combinaison B) est protégée de manière optimale contre l'intrusion d'eau.

Sa stabilité au soulèvement sera vérifiée. Il n'est pas nécessaire de prévoir des mesures à l'intérieur du bâtiment.

### 4 Combinaison de mesures D

En plus des mesures prévues par la combinaison C, le bâtiment est protégé contre l'affouillement, car la situation de danger comprend un risque d'érosion et d'alluvionnement.

### 5 Combinaison de mesures E

Ce groupe de mesures est spécialement destiné à la situation de danger 4 (érosion du lit). La construction existante peut être protégée en prenant des mesures contre l'affouillement, en renforçant et en

étanchant la paroi extérieure concernée et en protégeant les éventuelles ouvertures.

### 6 Combinaison de mesures F

Par position surélevée des constructions existantes, on entend ici leur rehaussement. Le bâtiment, ou du moins la partie située au-dessus du niveau du terrain, est rehaussé au moyen de vérins hydrauliques. Ainsi, le rez-de-chaussée passe au-dessus de la cote d'inondation.

Le nouvel étage intermédiaire créé de la sorte est supporté par des piliers ou des murs extérieurs. Ce mode de protection des objets est peu onéreux et très efficace pour les constructions légères en bois.

### 7 Combinaison de mesures G

Un mur ou une digue de protection est érigé autour du bâtiment ou du bien-fonds concerné. L'accès emprunte une rampe, sinon il est muni d'un portail étanche. Un puisard équipé d'une pompe immergée est aménagé au point le plus bas du

périmètre situé derrière l'ouvrage de protection afin d'extraire l'eau provenant de fuites. L'intérieur du bâtiment sera équipé d'un dispositif antireflux afin d'endiguer tout reflux dans les canalisations.

### Combinaison de mesures H

Cette combinaison est applicable aux nouvelles constructions dans lesquelles on ne peut exclure toute intrusion d'eau par les ouvertures. La vulnérabilité du bâtiment sera réduite en choisissant des matériaux

appropriés pour les aménagements intérieurs, en adaptant le système de distribution d'énergie et en prenant d'autres mesures à l'intérieur du bâtiment.

### Combinaison de mesures I

Dans ce cas, l'enveloppe du bâtiment est réalisée de manière étanche. Les ouvertures sont pratiquées en position surélevée ou étanchées et renforcées le cas échéant. Ainsi, il n'est pratiquement

pas nécessaire de prendre des mesures à l'intérieur du bâtiment.

### Combinaison de mesures J

Une position surélevée est indiquée en particulier lorsque la hauteur d'inondation est moyenne à élevée. Le bâtiment est construit sur un remblai, faute de quoi on optera pour une construction équivalente sur piliers ou murs de soutène-

ment. Ainsi, le bâtiment sera hors de portée de l'action directe des eaux et il ne sera pas nécessaire de prendre d'autres mesures.

### Combinaison de mesures K

Des mesures visant à protéger le bâtiment contre l'affouillement sont mises en œuvre en plus de celles de la combinaison I.

### Combinaison de mesures L

Un nouveau bâtiment ou groupe de bâtiments est protégé contre les inondations au moyen de murs ou de digues. Chaque construction est équipée afin d'empêcher tout reflux dans les canalisations. Le rez-de-chaussée et les ouvertures

proches du sol sont placés en position légèrement surélevée s'il faut s'attendre à l'apparition de résurgences d'un aquifère ou à l'infiltration d'eau.

### Combinaison de mesures M

Lorsqu'un nouveau bâtiment est construit près du lit d'un cours d'eau, la paroi extérieure menacée par l'érosion est protégée contre l'affouillement, renforcée et étanchée. Les ouvertures pratiquées dans cette paroi sont aménagées en position surélevée.

1

2

3



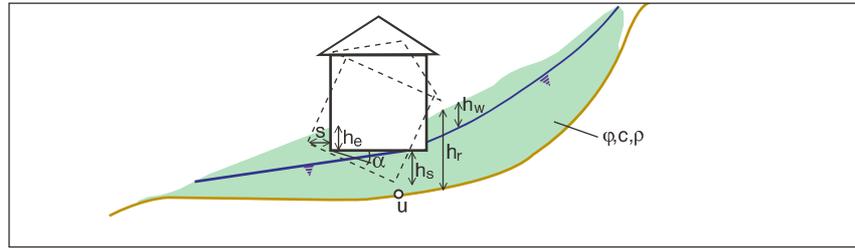
4

5

6

7

## 1 Notations concernant les glissements de terrain



2

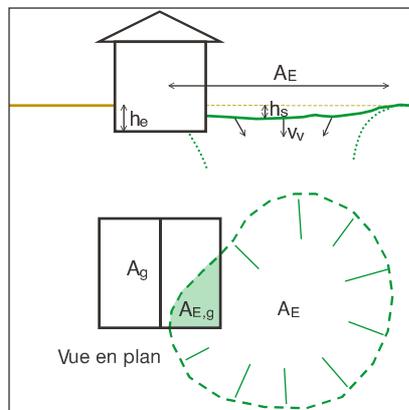
 $h_r$  [m] Profondeur du plan de glissement $h_e$  [m] Profondeur du bâtiment $h_w$  [m] Profondeur du niveau piézométrique $h_s$  [mm] Tassement par événement (glissements spontanés) $s$  [mm] Déplacement horizontal par événement (glissements spontanés) $v_f$  [mm/an] Vitesse (glissements permanents) $v_h$  [mm/an] Composante horizontale de la vitesse (glissements

permanents)

 $v_v$  [mm/an] Composante verticale de la vitesse (glissements permanents) $\rho$  [t/m<sup>3</sup>] Densité du sol $\alpha$  [°] Angle d'inclinaison du bâtiment $\phi$  [°] Angle de résistance au cisaillement du sol (angle de frottement) $c$  [kN/m<sup>2</sup>] Cohésion du sol $u$  [kN/m<sup>2</sup>] Pression d'eau interstitielle $q_{ea}$  [kN/m<sup>2</sup>] Pression active des terres

3

## 4 Notations concernant les effondrements et les tassements

 $h_s$  [mm] Hauteur de l'effondrement ou du tassement du sol $v_v$  [mm/an] Vitesse de tassement (phénomènes permanents) $A_E$  [m<sup>2</sup>] Superficie de l'entonnoir d'effondrement ou de tassement $A_{E,g}$  [m<sup>2</sup>] Superficie de la zone effondrée située dans l'aire de base du bâtiment $A_g$  [m<sup>2</sup>] Aire de base du bâtiment

5

## 6 Caractérisation

Les glissements de terrain sont différenciés en fonction de la profondeur de leur plan de glissement. On distingue les glissements superficiels ( $h_r < 2$  m), semi-profonds ( $2 \text{ m} < h_r < 10$  m) et profonds ( $h_r > 10$  m) comme décrit au chapitre introductif. Dans le cas des glissements spontanés, l'ampleur des dommages aux bâtiments et à leurs abords est essentiellement déterminée par l'amplitude du déplacement et du tassement. Pour les glissements permanents, le paramètre déterminant est la

vitesse du mouvement. Il faut s'attendre à d'importants dommages lorsque la grandeur et la direction des vecteurs vitesse présentent de grandes variations spatiales et temporelles. Le tableau suivant présente de manière succincte les dommages possibles selon la vitesse des glissements de terrain.

7

Vitesse* $v_f$	Domages pouvant affecter les bâtiments et l'espace extérieur
1 – 5 mm/an	Pas de dommage au bâtiment ou formation de fissures peu nombreuses, selon le type de construction et de fondation; légers tassements et soulèvements du sol dans l'espace extérieur.
10 – 50 mm/an	Formation de fissures peu nombreuses à nombreuses et/ou inclinaison du bâtiment; les phénomènes de tassement et de compression provoquent des modifications du terrain visibles à moyen terme, les conduites enterrées sont endommagées.
200 – 1000 mm/an	Formation de nombreuses fissures et/ou inclinaison du bâtiment; les phénomènes de tassement et de compression provoquent des modifications durables du terrain, les conduites enterrées doivent être entretenues chaque année pour rester opérationnelles.

\* Les dommages correspondant à cette activité sont dus aux variations de la vitesse et de la direction du mouvement au sein de la masse en

glissement. Lorsque la vitesse et la direction sont homogènes, les dommages surviennent en bordure du glissement (bords cisailés).

Les tassements différentiels sont habituellement mesurés au moyen de l'angle de rotation  $\tan\alpha$ . Il y a lieu d'appliquer les valeurs limites typiques suivantes:

$\tan\alpha = 1/750$   
*les machines sensibles rencontrent des problèmes*  
 $\tan\alpha = 1/500$   
*les ouvrages commencent à se fissurer*  
 $\tan\alpha = 1/250$   
*l'inclinaison des ouvrages élevés devient visible*  
 $\tan\alpha = 1/150$   
*la structure des ouvrages subit des dégâts*

### Paramètres d'intensité pour le dimensionnement

Pour dimensionner les mesures visant à protéger des objets contre les glissements de terrain, il faut disposer de données concernant la *profondeur du plan de glissement*. Dans le cas des glissements spontanés, on considère également la *position du niveau piézométrique*, les *caractéristiques du sol* et les éventuelles *surpressions d'eau interstitielle*. Dans le cas des glissements permanents, on tient

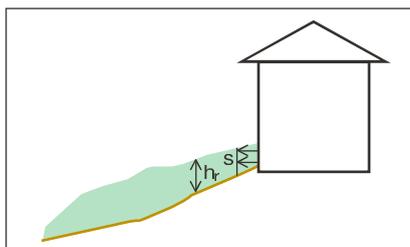
aussi compte de la *vitesse moyenne du mouvement*. S'agissant des effondrements, il faut disposer de données concernant la *hauteur* et la *superficie* du processus. Certains de ces paramètres peuvent être tirés des cartes d'intensités. Les autres paramètres requis seront déterminés par un spécialiste des dangers naturels.

1

Les glissements spontanés peuvent déboucher sur un déplacement rapide de la masse de terre à la surface du sol. Cette situation de danger est exposée dans le chapitre consacré aux laves torrentielles et aux coulées de boue.

2

## Situation de danger 1



*Un glissement superficiel s'éloigne d'un bâtiment*

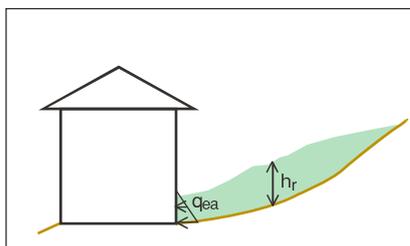
Le glissement de terrain s'éloigne du bâtiment d'une distance  $s$ , ce qui provoque une diminution de la pression des terres appliquée sur

les parois extérieures. Comme le plan de glissement est situé plus haut que les fondations, la stabilité globale de la construction n'est généralement pas remise en cause. Le mouvement de glissement occasionne des dommages aux abords du bâtiment (conduites, accès, ouvrages de soutènement, etc.).

3

4

## Situation de danger 2



*Un glissement superficiel s'avance contre un bâtiment*

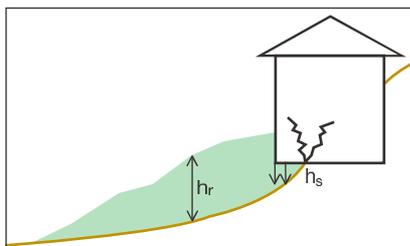
Le glissement de terrain s'avance contre le bâtiment, ce qui provoque un accroissement de la pression des terres  $q_{ea}$  appliquée sur les

parois exposées. La sécurité structurale des parois extérieures est en principe menacée. Lorsqu'un bâtiment de poids propre faible est affecté par un glissement de masse importante, sa stabilité au renversement ou au glissement peut aussi être menacée.

5

6

## Situation de danger 3



*Un glissement semi-profond entraîne une petite partie d'un bâtiment*

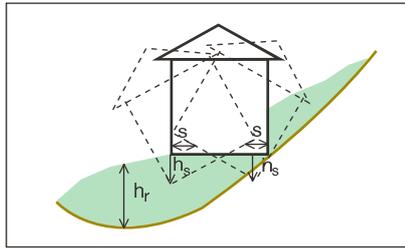
Le glissement de terrain provoque des tassements  $h_s$  et des déplacements  $s$ . La sécurité structurale de la partie affectée du bâtiment est



menacée selon le type de fondation et le concept statique de la construction. La stabilité globale est assurée tant que seule une petite partie du bâtiment est touchée.

7

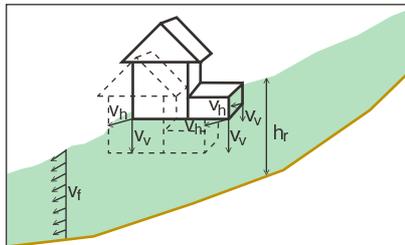
## Situation de danger 4



*Un glissement semi-profond entraîne l'ensemble d'un bâtiment*  
La sécurité structurale, la stabilité globale et l'aptitude au service du bâtiment sont menacées du fait des tassements différentiels  $h_s$  et des déplacements  $s$ .

L'ampleur et la nature des déformations (tassements/soulèvements, basculement, fissuration) dépendent du type de fondation et de la conception de la structure porteuse.

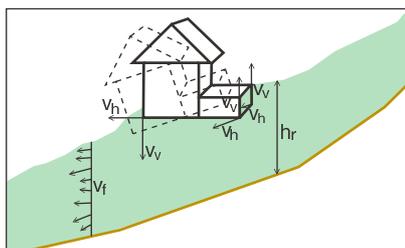
## Situation de danger 5



*Glissement profond de vitesse faible et homogène*  
L'ensemble du bâtiment est entraîné par le glissement de terrain. Mais le mouvement est lent et les

vecteurs vitesse (composantes horizontale et verticale) ont la même grandeur et la même direction dans la tranche de terrain correspondant à la profondeur de fondation. Les composantes horizontale et verticale du mouvement subi par la construction ne présentent donc aucune variation. Des dommages apparaissent aux bords cisailés du glissement et aux endroits où le terrain forme des bosses et des dépressions.

## Situation de danger 6

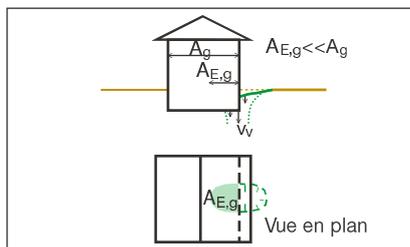


*Glissement profond de vitesse élevée et hétérogène*  
L'ensemble du bâtiment est entraîné par le glissement de terrain. Le mouvement est rapide et les vecteurs vitesse ont des grandeurs et des directions différentes dans la tranche de terrain correspondant à la profondeur de fondation. Les composantes horizontale et verticale du mouvement subi par la construction présentent donc d'importantes variations.



La sécurité structurale, la stabilité globale (basculement) et l'aptitude au service du bâtiment sont fortement menacées.

1 Situation de danger 7



*Effondrement de faible étendue*

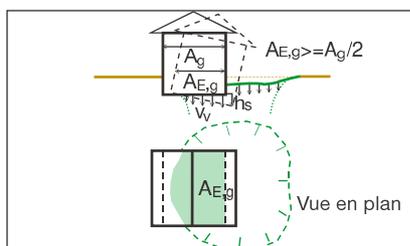
Seule une petite partie de l'aire de base du bâtiment est affectée par l'effondrement.

L'effondrement ou le tassement provoque des tassements de faible ampleur sous le bâtiment.

La sécurité structurale de la partie affectée est menacée selon le type de fondation et le concept statique de la construction. La stabilité globale du bâtiment reste généralement assurée.

2

3 Situation de danger 8



*Effondrement de grande étendue*

Une grande partie de l'aire de base du bâtiment est affectée par l'effondrement.

Sa stabilité globale n'est plus assurée. Il peut s'incliner ou se briser selon le type de fondation et le concept statique de la construction.

4

5 Détermination des  
actions

Les glissements de terrain affectent les bâtiments par le biais de la pression des terres, de la pression hydrostatique et des déformations du sol. Ces actions seront déterminées sur la base d'une expertise du sol de fondation et d'une appréciation géotechnique adaptées à l'ouvrage traité. En général, les informations concernant les glissements de terrain qui figurent sur les cartes de dangers et d'intensités ne suffisent pas pour dimensionner les mesures de protection des objets. Dans le seul cas des glissements superficiels, il est souvent possible de renoncer à une investigation de terrain plus approfondie. Les actions générées par les glissements de terrain et par les effondrements ne peuvent pas être exprimées directement au moyen de valeurs normées. Elles seront déterminées, conformément aux

conditions locales, en appliquant les règles de l'art de la géotechnique et du calcul des fondations. Trois approches principales s'offrent au spécialiste en géotechnique pour établir les actions: Différentes *investigations de terrain* permettent de déterminer la profondeur d'un plan de glissement déjà formé, la vitesse de glissement, la compacité du terrain et les paramètres relatifs à l'eau interstitielle. Des *essais de laboratoire* fournissent la densité, l'angle de frottement interne et la cohésion d'échantillons du sol. On peut calculer les actions en introduisant ces paramètres, ainsi que des données concernant la topographie locale, dans un *modèle numérique*. Ces modèles permettent en outre de contrôler l'efficacité des mesures envisageables pour protéger les objets.

6

7

### Choix du site

Lorsqu'un nouveau bâtiment est construit sur un site menacé par des phénomènes de glissement ou d'effondrement, le risque peut être réduit d'emblée en positionnant judicieusement la construction sur la parcelle concernée. En aménageant le terrain, il faut veiller à réaliser les remblais et les fouilles de façon à ralentir le mécanisme de glissement. Ce principe est

valable pour les glissements permanents comme pour les glissements temporaires durant la construction. C'est pourquoi les études doivent intégrer d'emblée les étapes de chantier défavorables, telle l'ouverture de la fouille. Les risques ne pouvant pas être jugulés par un calcul pertinent seront limités en procédant à des contrôles.

### Concept statique et fondations

Le concept statique d'un bâtiment est considéré comme favorable lorsque de petits tassements du terrain situé sous le corps de la construction ne provoquent pas de dégâts tels que fissures. C'est pourquoi il y a lieu de choisir un mode de construction monolithique. Les annexes seront toujours parfaitement distinctes au plan statique. Le type de fondation retenu devra également être insensible aux

tassements et aux déplacements éventuels. Les fondations plates comprenant un radier renforcé ont généralement fait leurs preuves. Les fondations peuvent être soumises à des exigences supplémentaires selon le type de glissement. Le paragraphe « Report des charges, redressement et mesures de renforcement » fournit des détails à cet effet.

### Concept d'utilisation des espaces intérieurs

Dans le cas d'un glissement profond, le concept d'utilisation des espaces intérieurs doit être adapté à la situation. Un bâtiment qui se déplace avec un terrain en mouvement risque de s'incliner. Selon le concept statique appliqué, il sera possible de redresser l'ouvrage ou certaines parties de celui-ci (cf. ci-dessous). Il faut s'attendre à ce que

les sous-sols, notamment, ne puissent plus être redressés et doivent rester en position inclinée. Ce point devrait être pris en compte dès la première étape d'agencement des espaces intérieurs.

### Introduction des conduites

Les conduites enterrées sont endommagées aux emplacements où la vitesse de glissement présente d'importantes variations spatiales. Ces zones se trouvent généralement en bordure des glissements de terrain, siège de cisaillements,

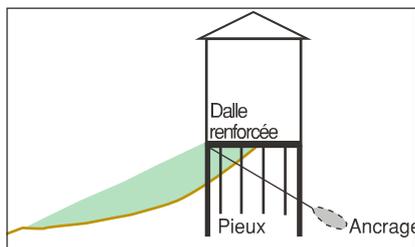
et au passage des conduites du sous-sol au bâtiment. Les projets peuvent se référer aux directives pour les installations de transport par conduites (SSIGE 2001, SSIGE 2004).

### Evacuation des eaux pluviales

Il est préférable d'évacuer les eaux superficielles plutôt que de les infiltrer. L'eau est souvent le principal moteur des glissements de terrain. C'est pourquoi l'on s'efforce de maintenir le niveau piézométrique aussi bas que possible. Il faut

donc capter les sources et éviter d'infiltrer les eaux provenant des toitures.

### 1 Report des charges sous le plan de glissement

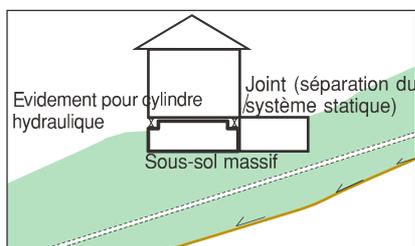


Les charges s'exerçant sur le bâtiment sont transmises par des voiles ou des pieux dans le sous-sol stable. Cette mesure peut être mise en œuvre en cas de glissement d'activité modérée ou d'effondrement superficiel. Le mouvement de la masse instable n'est pas entravé notablement. Le bâtiment repose à la manière d'un pont sur des piliers fondés sur un niveau résistant du sous-sol. On opte généralement pour des puits périphériques lorsqu'il s'agit de choisir les pieux.

2

### 3 Redressement du bâtiment par rehaussement

Les mesures suivantes visent à rehausser la partie affaissée des bâtiments situés sur des glissements profonds à semi-profonds. Elles sont mises en œuvre lorsque la masse en mouvement a une taille telle qu'on ne peut pas l'influencer par des mesures de stabilisation.



*Evidement pour cylindre hydraulique*

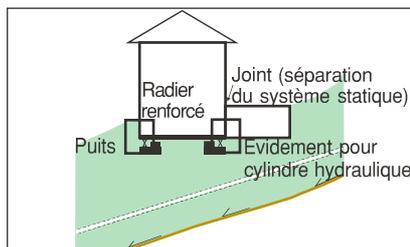
4

5

6

7

*a) Séparation statique entre le sous-sol et les étages supérieurs*  
Le sous-sol et les étages supérieurs sont isolés au niveau statique. Des puits sont aménagés pour accueillir des vérins hydrauliques. Si le bâtiment se penche, les étages peuvent être redressés, tandis que le sous-sol reste en position inclinée. Le processus est répété lorsque l'ouvrage s'incline à nouveau.



*b) Appui sur des semelles isolées*  
Si l'ensemble du bâtiment incliné doit être redressé, les évidements nécessaires aux vérins hydrauliques seront prévus dans les fondations. Cette variante n'est donc généralement applicable qu'aux nouvelles constructions. L'accès aux appuis est assuré par des puits isolés au niveau statique, disposés aux coins du bâtiment. On placera si nécessaire des puits supplémentaires sous les parois extérieures ou sous le corps du bâtiment.

*c) Rehaussement par injection de résine synthétique*  
L'injection de résine synthétique sous les fondations d'un bâtiment existant permet de rehausser son côté affaissé. Une machine spéciale injecte la résine dans le sous-sol à travers les fondations, dans des trous forés à cet effet. Le rehaussement de l'ouvrage est dû à l'expansion de la résine, qui se dilate d'un facteur 15 à 20. Il en résulte une pression qui peut dépasser les 50 t/m<sup>2</sup>.



### Renforcement du radier et des parois extérieures

Le renforcement du radier et des parois extérieures est une exigence minimale dans de nombreuses combinaisons de mesures proposées. Dans les nouvelles constructions, ce renforcement peut être obtenu en augmentant le pourcentage d'armature lorsque la structure porteuse est en béton armé. Pour les constructions existantes, on ajoutera une armature collée ou un complément d'armature combiné avec une couche de gunité ou de béton de parement.

### 1 Stabilisation par la mise en place d'éléments de soutènement

2

3

4

5

6

7

#### a) Ancrage en sol meuble ou en rocher

Un compartiment instable de sol meuble ou de roche est solidarisé avec un compartiment stable de sol meuble ou de roche à l'aide d'ancrages.

Dans le cas d'ancrage en sol meuble, la zone d'ancrage est située dans un terrain meuble; la résistance externe, due au frottement latéral mobilisable entre le scellement et le sol, est déterminée par la composition granulométrique et la compacité du terrain.

Dans le cas d'ancrage en rocher, la zone d'ancrage est située dans de la roche; la résistance externe est déterminée par la nature de celle-ci (résistance, dureté, rugosité, fissuration, stratification, etc.).

Selon leur application, les tirants d'ancrage sont:

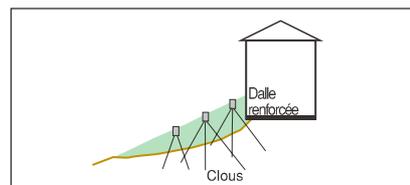
- totalement précontraints: la mise en tension correspond à la force d'utilisation exigée,
- partiellement précontraints: la mise en tension correspond à une fraction de la force d'utilisation, ou
- passifs: la contrainte apparaît lorsque la tête d'ancrage se déforme.

Les normes SIA V191 « Tirants d'ancrage précontraints en sol meuble et en roche » et SIA 191/1 « Tirants d'ancrage passifs (clous) à adhérence totale » comprennent davantage de détails concernant les ancrages.

#### b) Clous

Dans la technique du clouage, les clous (barres d'acier) visent à susciter, dans un plan de glissement existant, des efforts tranchants qui s'opposeront au mouvement de la masse instable. Des contraintes de cisaillement pur apparaissent lorsque le plan de glissement coïncide avec l'interface entre deux couches rigides. Des contraintes de cisaillement dues à la flexion sont produites dans

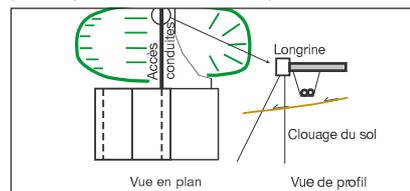
les sols mous. Les clous disposés pour assainir un glissement de terrain se courbent au niveau du plan de glissement sous l'effet des mouvements qui s'y produisent, si bien qu'ils reprennent principalement des efforts de traction.



Les clous sont enrobés de mortier sur toute leur longueur. Ils peuvent être répartis sur le corps en glissement selon un canevas linéaire ou surfacique. L'agencement linéaire est préférable lorsqu'il s'agit de sécuriser des objets spécifiques (bâtiments, accès, etc.).

On regroupe toujours deux ou trois clous pour former un élément statique (chevalet).

Le clouage du sol présente divers avantages. Il est simple à exécuter et ne nécessite pas de grosse installation. Ce système flexible est à même de s'adapter aux éventuels mouvements de reptation à grande échelle sans que le dispositif ne se rompe. Sa mise en œuvre est principalement limitée par la



profondeur et par l'extension (volume) du glissement de terrain. Si le plan de glissement se trouve à plus de 6 à 8 m de profondeur ou s'il s'agit de reprendre des efforts tranchants supérieurs à quelque 300 kN/m' (effort global), le clouage est généralement peu rentable par comparaison avec les solutions à base d'ancrages précontraints ou de pieux. La combinaison de clous et d'une longrine permet en outre de protéger efficacement les conduites enterrées et les routes d'accès.

c) Pieux

Les pieux sont généralement distingués selon les quatre caractéristiques suivantes:

Caractéristique distinctive	Nom	Description
Lieu et mode de fabrication	Pieu préfabriqué	Pieu préfabriqué.
	Pieu moulé dans le sol	Le pieu est confectionné dans le sol en coulant du béton ou en injectant les matériaux constitutifs.
Mode d'introduction dans le sol	Pieu battu	Le pieu est introduit dans le sol par battage, vibration ou application de pression statique (pieu foncé). Le sol en place est refoulé.
	Pieu foré	Le trou qui accueillera le pieu est aménagé en retirant des matériaux du sol.
Mode de transfert des charges	Pieu colonne	Le transfert des charges dans le sol s'opère principalement à la pointe du pieu (résistance en pointe).
	Pieu flottant	Le transfert des charges dans le sol s'opère principalement le long du pieu (frottement latéral).
Mode de sollicitation	Pieu en compression	Pieu sollicité principalement en compression; utilisé par exemple pour les fondations profondes.
	Pieu en traction	Pieu sollicité principalement en traction; utilisé par exemple pour contrer la pression hydrostatique (cf. chapitre consacré aux mesures contre les crues).
	Pieu en flexion	Pieu sollicité principalement en flexion et en cisaillement; utilisé par exemple pour contrer les glissements de terrain.

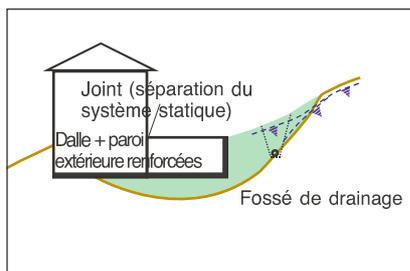
On distingue en outre les pieux en bois, en acier et en béton, selon les matériaux les constituant.

Les pieux destinés à stabiliser une masse en glissement sont généralement combinés avec des ancrages. Dans le cadre de la protection des objets contre les glissements de terrain, les pieux sont surtout utilisés pour fonder les bâtiments dans la partie stable du sous-sol.

La norme SIA V192 « Pieux » comprend des données détaillées concernant leur dimensionnement.

### 1 Stabilisation par réduction de la pression interstitielle

Les techniques suivantes sont applicables lorsqu'il est possible de retirer l'eau du sol sous des conditions hydrostatiques normales. Le bon fonctionnement du système de drainage doit être contrôlé périodiquement.



#### a) Fossés de drainage

Les glissements de terrain peuvent être stabilisés par l'aménagement de fossés de drainage lorsque les couches à drainer sont proches de la surface (profondeur entre 1 et 3 m). L'avantage de ce procédé réside dans le fait qu'on peut évaluer les conditions régnant effectivement sur le site en ouvrant les fouilles, si bien qu'il est possible d'optimiser le système de drainage pendant sa construction.

#### b) Forages horizontaux à partir de la surface

La réalisation de forages horizontaux s'impose lorsque le terrain est en pente et que les couches à drainer sont hors de portée des fossés de drainage à ciel ouvert. Des forages rayonnants sont réalisés à partir d'une chambre collectrice. Ils sont équipés de tuyaux perforés entourés d'une couche filtrante, mis en place à l'aide de diverses techniques.

#### c) Drainages horizontaux à partir de puits verticaux

Si les couches à drainer sont à une profondeur encore supérieure, il faut prévoir des drainages horizontaux à partir de puits verticaux.

### 4

### 5 Stabilisation par modification de la topographie

#### a) Remblai de contrepoids

On érige fréquemment un remblai de contrepoids comme mesure d'urgence contre un glissement de terrain. Ce procédé peut aussi être utilisé préventivement pour empêcher le déclenchement d'un glissement. Il n'est efficace que si le remblai peut agir directement sur le corps susceptible de glisser. Il faut donc examiner si des plans de glissement peuvent se trouver hors de la zone d'influence du remblai.

#### b) Aplatissement

L'aplatissement de secteurs très raides est une mesure envisageable pour prévenir les glissements superficiels spontanés (notamment provoqués par de fortes précipitations). Comme cette mesure présuppose une intervention importante dans la topographie, elle devrait être intégrée le plus tôt possible dans la planification.

### 7

Combinaisons de mesures

Combinaison de mesures	Situation de danger	Conception					Report des charges Redressement Renforcement				Stabilisation		
		Choix du site	Concept statique/fondations	Concept d'utilisation des espaces intérieurs	Introduction des conduites	Evacuation des eaux pluviales	Report des charges sous le plan de glissement	Redressement par rhaussement	Renforcement des parois extérieures	Renforcement du radier	Éléments de soutènement	Réduction de la pression interstitielle	Modification de la topographie
<b>Construction existante</b>													
A	1/2					•					•		
B	1/2					•					•		
C	1/2					•						•	
D	2				•	•		•					
E	3				•	•	•			•			
F	4				•	•		•		•			
G	4				•	•		•		•	•		
H	5/6				•	•		•	•	•			
I	7					•				•			
J	8				•	•	(•)	•		•			
<b>Nouvelle construction</b>													
K	1	•			•	•							
L	2	•			•	•			•				
M	1/2	•				•				•			
N	1/2	•				•					•		
O	1/2	•				•						•	
P	3	•	•		•	•	•			•			
Q	4	•	•			•		•		•	•		
R	4	•	•			•		•		•	•		
S	5		•	•	•	•		•		•			
T	6		•	•	•	•		•	•	•			
U	7	•	•			•				•			
V	8	•	•		•	•	(•)	•		•			

## 1 Combinaisons de mesures A, B et C

Le danger est dû à un glissement superficiel. Le bâtiment existant est protégé en stabilisant la masse en glissement. Ce résultat est obtenu au moyen d'éléments de soutène-

ment ou de drainages, ou en aplatissant la pente.

## 2 Combinaison de mesures D

Un glissement superficiel s'avance contre le bâtiment. Le surcroît de pression des terres est contré en renforçant la paroi extérieure menacée. Si des conduites enterrées se trouvent dans la zone influen-

cée par le glissement, il y a lieu de prévoir des mesures de protection telles que trappes coulissantes, dispositifs de sécurité en cas de rupture ou de déboîtement, ou regards de contrôle.

## 3 Combinaison de mesures E

Le plan de glissement passe à une profondeur supérieure à celle des fondations du bâtiment et la masse en mouvement s'en éloigne. Les charges sont transmises dans la partie stable du sous-sol au moyen de voiles ou de micropieux. Ce procédé requiert le cas échéant un

renforcement du radier du bâtiment. Les conduites enterrées à l'extérieur de celui-ci doivent également faire l'objet de mesures de protection plus poussées, telles que trappes coulissantes, dispositifs de sécurité en cas de rupture ou de déboîtement, ou regards de contrôle.

## 4 Combinaisons de mesures F et G

Le plan de glissement passe à une profondeur supérieure à celle des fondations du bâtiment. La masse en glissement est stabilisée au moyen d'éléments de soutènement ou d'un drainage profond. Des tassements et des déplace-

ments risquent de survenir pendant le processus de stabilisation, si bien qu'il peut s'avérer nécessaire de renforcer le radier et de redresser le bâtiment en rehaussant la partie affaissée.

## 5 Combinaison de mesures H

Un glissement profond ne peut pas être influencé par des mesures de stabilisation. Les bâtiments inclinés sont redressés au moyen de vérins hydrauliques. Si la vitesse de mouvement présente d'importantes variations spatiales (situation de

danger 6), il faut en outre renforcer le radier et les parois extérieures, dans la mesure où le mode de construction le permet.

## 6 Combinaison de mesures I

Un effondrement de faible étendue menace une partie du bâtiment. La zone de faiblesse localisée peut être confortée en renforçant le

radier localement et en approfondissant éventuellement les fondations, par exemple en disposant des pieux.

## 7 Combinaison de mesures J

Un effondrement du sous-sol menace la stabilité de l'ensemble du bâtiment. Si le processus se développe lentement, on peut lutter contre l'inclinaison de la construction en la redressant. Selon les caractéristiques de l'effondrement, il

sera possible de transmettre les charges dans des couches stables en disposant des pieux.

### Combinaisons de mesures K et L

Un nouveau bâtiment est construit sur une parcelle menacée par un glissement superficiel. Le site est choisi et le terrain aménagé en s'efforçant de réduire le danger. Les parois extérieures sont renforcées dans les secteurs où l'on craint un accroissement de la pression des terres. L'évacuation minutieuse des eaux superficielles permet de diminuer la probabilité de déclenchement d'un glissement de terrain. Les conduites sont posées si possible dans des zones qui ne sont pas affectées par le

glissement. Sinon, il y a lieu de prévoir d'emblée des mesures de protection plus poussées.

### Combinaisons de mesures M, N et O

Si le choix du site et l'aménagement du terrain ne permettent pas encore de réduire suffisamment le danger, il y a lieu de mettre en œuvre des mesures de stabilisation du corps en glissement.

### Combinaison de mesures P

Contrairement à la combinaison de mesures E (construction existante), les mesures requises concernant les fondations (transmission des charges dans la partie stable du sous-sol) et le radier peuvent être réalisées d'emblée lorsque l'on construit un nouveau bâtiment.

### Combinaisons de mesures Q et R

Ces combinaisons se distinguent des variantes équivalentes applicables aux constructions existantes par le fait que le renforcement du radier est planifié d'emblée.

### Combinaisons de mesures S et T

Les nouveaux bâtiments construits sur des glissements profonds doivent être conçus d'emblée de manière à ce qu'on puisse les redresser le cas échéant. Cette exigence requiert un concept statique adéquat, comprenant des

évidements pouvant accueillir des vérins hydrauliques.

### Combinaisons de mesures U et V

Lorsqu'on érige un nouveau bâtiment, il est possible le cas échéant d'échapper au danger d'effondrement en choisissant soigneusement le site. Sinon, il est notamment important de renforcer le radier et de faire en sorte qu'on

puisse rehausser la partie affaissée de la construction.

1

2

3

4

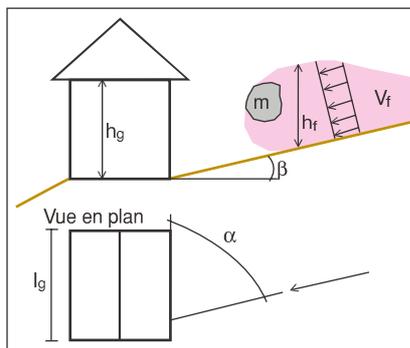


5

6

7

## 1 Notations



2

$v_f$  [m/s] Vitesse d'écoulement de la lave torrentielle

$h_f$  [m] Hauteur d'écoulement de la lave torrentielle

$h_a$  [m] Epaisseur des matériaux déposés par la lave torrentielle

$h_{\text{stau}}$  Hauteur de retenue d'une lave torrentielle

$m$  [t] Masse du plus gros bloc transporté

$l_g$  [m] Longueur de la paroi touchée

$l_h$  [m] Epaisseur de la paroi en béton armé

3

4

## Caractérisation

*Volume*

Les grandes laves torrentielles qui surviennent dans les Alpes charrient plusieurs centaines de milliers de mètres cubes de matériaux, tandis que les petites en transportent quelques centaines ou milliers.

*Hauteur et vitesse d'écoulement*

Il ne s'agit pas moins de phénomènes très dangereux, car la vitesse des coulées dévalant des chenaux, qui peut atteindre 15 à 20 m/s, est supérieure à celle des inondations. Cette vitesse tombe à une valeur comprise entre 2 et 7 m/s aux endroits où la déclivité diminue et où les coulées peuvent

$l_s$  [m] Portée de la paroi en béton armé

$\rho_f$  [t/m<sup>3</sup>] Densité de la lave torrentielle

$\alpha$  [°] Angle de déviation

$\beta$  [°] Déclivité de la pente

$\gamma$  [°] Angle d'ouverture de l'étrave

$g$  [m/s<sup>2</sup>] Accélération gravitationnelle (10 m/s<sup>2</sup>)

$q_f$  [kN/m<sup>2</sup>] Pression exercée par la lave torrentielle

$q_a$  [kN/m<sup>2</sup>] Surcharge due aux laves torrentielles

$q_{f,r}$  [kN/m<sup>2</sup>] Frottement spécifique

$q_e$  [kN/m<sup>2</sup>] Pression statique de remplacement due à une charge concentrée (choc)

$a$  [-] Coefficient de pression

$A$  [m<sup>2</sup>] Surface d'impact d'une charge concentrée

$Q_e$  [kN] Force statique de remplacement due à une charge concentrée (choc)

5

6

s'étaler. La hauteur d'écoulement d'une lave torrentielle est de l'ordre de 0.5 à 3 m. Lorsqu'elle s'étale, sa hauteur décroît en conséquence. Si plusieurs laves torrentielles peuvent s'écouler dans le même chenal au cours d'un seul épisode pluvieux, ce phénomène est observé moins fréquemment pour les coulées de boue.

*Préalerte*

Il n'est pas possible de déterminer à l'avance quand une lave torrentielle ou une coulée de boue se produira. La mise en place d'un système de préalerte n'est possible que dans certains cas particuliers.

7

## Paramètres d'intensité pour le dimensionnement

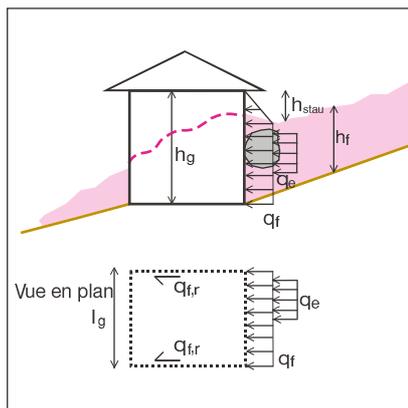
Pour dimensionner les mesures visant à protéger des objets, il faut disposer de données concernant la hauteur et la vitesse d'écoulement des laves torrentielles ou des coulées de boue. Ces données

peuvent être tirées des cartes d'intensités et du rapport technique. Si les données concernant les intensités font défaut, elles seront déterminées par un spécialiste des dangers naturels.

Les situations de danger suivantes décrivent les atteintes subies par un bâtiment percuté ou contourné par un mélange d'eau et de matériaux solides. Ces actions peuvent être occasionnées par une lave

torrentielle, une coulée de boue ou un glissement de terrain superficiel spontané. Pour simplifier le propos, on utilisera uniquement l'expression *lave torrentielle* dans la suite du texte.

### Situation de danger 1

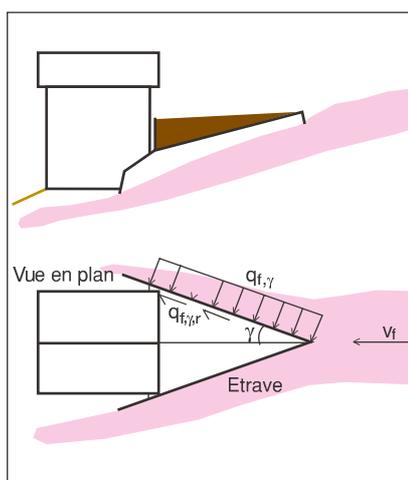


Une lave torrentielle percute un bâtiment

Le mélange d'eau et de matériaux solides percute la façade frontale du bâtiment. La collision occasionne une retenue de hauteur  $h_{\text{stau}}$ , qui, cumulée avec la hauteur d'écoulement  $h_f$  de la lave torrentielle, ne dépasse pas la hauteur  $h_g$  du bâtiment. La toiture ne subit

donc aucune action directe. L'action déterminante est la pression  $q_f$  exercée sur la paroi extérieure. Elle est notamment influencée par la forme du bâtiment ainsi que par la densité et la vitesse de la lave torrentielle. On admet que cette vitesse  $v_f$  est constante sur toute la hauteur d'écoulement. Pour les parois latérales et toutes les parois atteintes obliquement, on appliquera une pression réduite en fonction de l'angle d'incidence  $\alpha$ . Ces parois subissent également des actions dues aux frottements. Le choc occasionné par les composantes individuelles de grande taille (blocs, troncs d'arbres) est pris en compte en appliquant une pression statique de remplacement  $q_e$ .

### Situation de danger 2



Une lave torrentielle contourne un bâtiment précédé d'un ouvrage de déviation (étrave)

L'étrave subit des actions dues aux pressions occasionnées par son contournement et par les frottements engendrés. La pression  $q_{f,\gamma}$  agissant sur l'étrave est réduite en fonction de l'angle de déviation  $\gamma$ . Cet angle sera de  $30^\circ$  au maximum. Sinon, il n'y a plus d'effet défecteur et l'on est en présence d'un choc tel que décrit dans la situation de danger 1. L'étrave doit en outre avoir une hauteur suffisante. (Les actions déterminantes dans cette situation de danger correspondent à celles que subissent les murs et digues défecteurs.)

### 1 Hauteur de retenue lors d'un choc occasionné par une lave torrentielle

Lorsqu'une lave torrentielle percute un objet, la hauteur de retenue se calcule de la manière suivante:

$$h_{\text{stau}} = (v_f^2) / (2 * g) \text{ [m]}$$

*Hauteur de retenue d'une lave torrentielle*

### 2 Pression résultant de la contrainte dynamique

La pression  $q_f$  exercée par la contrainte dynamique dépend de la vitesse de la lave torrentielle, de sa densité, de l'angle de déviation et d'un coefficient de pression empirique  $a$  (GEO 2000).

$$q_f = a * \rho_f * v_f^2 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

*Pression exercée par une lave torrentielle*

$a$  prend les valeurs indicatives typiques suivantes:

$$a = 2$$

*Lave torrentielle boueuse*

$$a = 4$$

*Lave torrentielle granulaire*

La densité de la lave torrentielle vaut:

$$\rho_f = 1.8 \text{ [t/m}^3\text{]}$$

*Lave torrentielle boueuse*

$$\rho_f = 2.2 \text{ [t/m}^3\text{]}$$

*Lave torrentielle granulaire*

Pour les surfaces qui ne sont pas perpendiculaires à la direction d'écoulement, on tiendra compte de l'angle de déviation  $\alpha$ .

$$q_{f,\alpha} = q_f * \sin^2 \alpha \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

*Pression en cas d'incidence oblique*

Pour les parois latérales parallèles à la direction d'écoulement, on appliquera la pression régnant lorsque les matériaux solides sont déviés d'un angle  $\alpha = \pm 20^\circ$ .

### 5 Pression résultant des contraintes hydrodynamique et hydrostatique

Lorsqu'une lave torrentielle emprunte un chenal, il faut s'attendre à ce que la contrainte dynamique due au choc de la coulée soit suivie d'une contrainte causée par l'écoulement de l'eau. Il y a lieu

d'étudier si cette séquence de contraintes hydrodynamique-hydrostatique est éventuellement déterminante pour certaines parties du bâtiment. Les pressions pertinentes seront calculées en se référant au chapitre consacré aux crues.

### 6 Surcharge verticale

La surcharge due aux matériaux solides déposés sur un bâtiment submergé vaut:

$$q_a = \rho_f * g * h_a \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

*Surcharge due à une lave torrentielle*

### 7 Pression due aux frottements

Les forces de frottement doivent notamment être prises en compte lorsqu'on traite un ouvrage de déviation tel qu'étrave ou mur déflec-

teur. Pour les laves torrentielles, on peut les estimer en appliquant la formule qui décrit la contrainte d'entraînement par un liquide:

$$q_{f,r} = \rho_f * g * h_f * \tan \beta \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

*Frottement spécifique*

Force de choc due aux composantes individuelles

La force de choc due aux composantes individuelles (blocs ou troncs d'arbres entraînés au front d'une lave torrentielle) représente, avec la force de pression, la principale action occasionnée par les débordements de laves torrentielles. En appliquant les mêmes hypothèses qu'au chapitre consacré aux

chutes de pierres, on peut baser les calculs sur les forces statiques de remplacement  $Q_e$  suivantes, qui agissent sur une paroi en béton d'épaisseur  $l_h = 0.3m$  et de portée  $l_s = 2.5m$  (hypothèses: rupture ductile, déflexion max. 25 mm, pas d'encastrement,  $C_K = 0.4$ ,  $\gamma_Q = 1.0$ ,  $\gamma_R = 1.0$ ):

Masse du bloc m	Vitesse de la lave torrentielle $v_f$	Surface d'impact A	Force statique de remplacement $Q_e$
0.1 t	3 m/s	0.30 m x 0.30 m	7 kN
0.5 t	3 m/s	0.50 m x 0.50 m	36 kN
1.0 t	3 m/s	0.65 m x 0.65 m	72 kN
0.1 t	6 m/s	0.30 m x 0.30 m	29 kN
0.5 t	6 m/s	0.50 m x 0.50 m	144 kN
1.0 t	6 m/s	0.65 m x 0.65 m	288 kN

La force statique de remplacement peut être calculée comme suit pour d'autres épaisseurs  $l_h$  et portées de parois  $l_s$ :

$$Q_e' = (Q_e * 2.5 * l_h) / (0.3 * l_s)$$

On admet que cette charge concentrée agit simultanément avec la pression  $q_f$  exercée par la lave torrentielle. Applicable à n'importe quel endroit sur la hauteur de l'écoulement, elle est répartie uniformément sur la surface d'impact A:

$$q_e = Q_e / A \quad [kN/m^2]$$

Pression statique de remplacement due à une charge concentrée (choc)

Si la paroi affectée adopte un comportement fragile et non ductile (poinçonnement par la charge concentrée), il y a lieu de prendre en compte une force statique de remplacement plus élevée (se référer au chapitre consacré aux chutes de pierres).

### 1 Intégration dans le terrain

Les bâtiments bien intégrés dans le terrain sont protégés contre les atteintes directes des laves torrentielles. Lorsque le volume des coulées est modeste, ce résultat est obtenu en plaçant le corps du bâtiment en position haute. Si l'on craint des

coulées de volume important, on choisira plutôt de placer le bâtiment en position basse et d'aménager un remblai devant lui. Cette mesure permet de réduire la surface de la paroi extérieure à protéger.

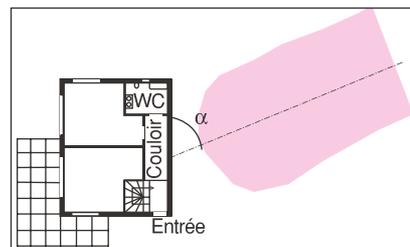
### 2 Forme du bâtiment

La forme du bâtiment détermine les pressions effectivement appliquées contre les parois extérieures touchées. Il est judicieux de présenter des configurations en forme de coin, ou du moins des formes incurvées, au flot principal des laves torrentielles. En revanche, l'effet des angles saillants et des éléments convexes,

tels que cheminées ou encorbellements, est très défavorable. On veillera en outre à ce qu'aucune conduite (chêneau, conduit d'aération de citerne, etc.) ne se trouve sur la façade extérieure directement touchée. Elle serait endommagée ou arrachée sous le choc de la lave torrentielle.

### 3 Concept d'utilisation des espaces intérieurs

Une utilisation judicieuse des espaces intérieurs permet de réduire le risque encouru par les personnes séjournant dans le bâtiment. On disposera des pièces généralement occupées pour de brèves durées, telles que couloirs de liaison ou salles d'eau, au voisinage de la paroi extérieure directement menacée.



### 4 Position et hauteur des ouvertures



Les ouvertures pratiquées dans le bâtiment, telles que portes ou fenêtres, sont les points les plus vulnérables vis-à-vis de l'action des

laves torrentielles. C'est pourquoi il faut éviter de placer des fenêtres dans la paroi extérieure amont menacée, ou sinon leur conférer une petite taille. De telles ouvertures doivent être renforcées dans tous les cas (cf. ci-dessous). On évitera de placer des entrées sur le côté exposé aux laves torrentielles ou on les protégera en permanence en appliquant des mesures appropriées.

### 5 Concept d'utilisation de l'espace extérieur

Il est judicieux de cantonner les utilisations de l'espace extérieur impliquant un séjour prolongé dans les secteurs protégés par le bâtiment. C'est pourquoi on placera les balcons et les terrasses contre les parois latérales ou celles qui sont à l'abri des laves torrentielles.

Renforcement des parois extérieures



Les parois extérieures menacées doivent être conçues en fonction de la pression et des frottements engendrés par la lave torrentielle. Il faut habituellement les renforcer pour satisfaire à cette exigence (détails dans le chapitre consacré

aux chutes de pierres). En général, l'ampleur des frottements ne permet pas de revêtir les façades, par exemple de bardeaux en bois ou en plastique.

La surface de la paroi extérieure directement touchée peut être réduite en aménageant un remblai. La pression générée par la lave torrentielle dans la zone d'influence du remblai sera réduite, mais il faudra prendre en compte le surcroît de pression dû à la poussée des terres.

Protection des ouvertures

Les portes et les fenêtres doivent être conçues en fonction de la pression à laquelle elles seront soumises. Les portes seront fixées à l'extérieur. La charge appliquée sur les fenêtres sera transmise de la vitre au cadre et du cadre à la construction qui l'entoure. Les fenêtres latérales et celles qui sont soumises à des pressions faibles peuvent être protégées en utilisant des verres de sécurité feuilletés suffisamment résistants. Les fenêtres faisant face à l'écoulement des laves torrentielles seront protégées

de surcroît par des croisillons, des plaques défectrices ou des palplanches contre les charges concentrées (blocs). On peut n'appliquer ces écrans que durant la période des laves torrentielles – du printemps à l'automne – et les retirer en hiver afin de laisser passer la lumière par les ouvertures concernées.

Le tableau suivant donne une vue d'ensemble des verres recommandés en précisant leur épaisseur minimale et les dimensions qui conviennent (source: Institut suisse du verre dans le bâtiment, Zurich):

Verre simple tenu sur les 4 côtés	Pression de la lave torrentielle $q_f$		
Dimensions	5 kN/m <sup>2</sup>	10 kN/m <sup>2</sup>	30 kN/m <sup>2</sup>
60x60 cm	VSF en VF de 2x5 mm	2x8 mm	2x12 mm
100 x 100 cm	VSF en VF de 2x8 mm	2x12 mm	--
100 x 200 cm	VSF en VF de 2x12 mm	2x19 mm	--

VSF: verre de sécurité feuilleté selon la norme EN 12543, 2<sup>e</sup> partie  
 VF (verre flotté): verre à vitre selon la norme EN 572, 2<sup>e</sup> partie

S'il est fait usage de verre isolant, le vitrage extérieur devrait être dimensionné comme le verre simple d'après le tableau ci-dessus et être couplé avec un vitrage intérieur épais de 8 mm au minimum.

1

Certaines mesures à effet d'écran peuvent exercer une influence déterminante sur la propagation des phénomènes dangereux. Des mesures de ce type ne peuvent être

appliquées que si leur mise en œuvre ne provoque aucune augmentation de la menace pesant sur les objets voisins. Le symbole  attire l'attention sur ce problème.

2

Digue de retenue

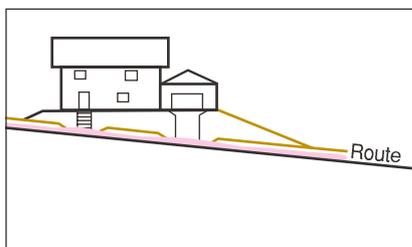


On peut ériger une digue de retenue pour protéger un objet contre une petite lave torrentielle. Elle doit être en mesure de contenir intégralement le phénomène en question. Pour cela, il faut que sa hauteur soit supérieure au cumul de la hauteur d'écoulement  $h_f$  et de la hauteur de retenue  $h_{stau}$  de la lave torrentielle. Il faut également s'assurer que le volume de rétention soit suffisant pour contenir la lave torrentielle ou les différentes coulées qui pourraient descendre lors d'un épisode pluvieux. Les calculs de stabilité de la digue se baseront sur la pression attendue et viseront à éviter tout glissement de matériaux constituant l'ouvrage.

3

4

Position surélevée



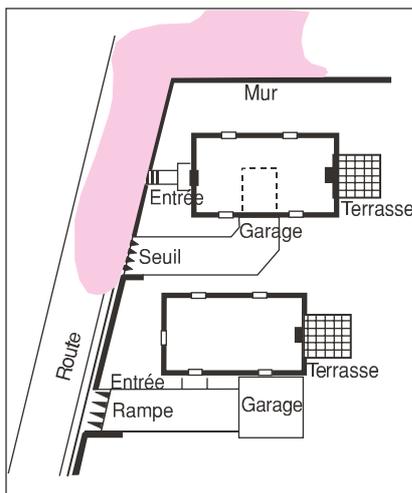
Dans de nombreux cas, la mesure la plus économique et la plus efficace pour réduire le risque pesant

sur un nouveau bâtiment consiste à le construire sur un remblai. En procédant de la sorte, l'objet menacé peut être mis intégralement à l'abri des dépôts. Il y a lieu de protéger le remblai contre l'érosion externe aux endroits où l'écoulement est rapide. Lorsque cette mesure est mise en œuvre, il faut veiller à ce que le résultat soit bien intégré dans le paysage.

5

6

Mur ou digue de déviation



La construction d'un mur ou d'une digue de déviation permet d'infléchir la trajectoire de la lave torrentielle dans une direction souhaitée. Le coût des ouvrages générant une déflexion comprise entre 20° et 30° est encore raisonnable. Si l'angle de déviation est supérieur, il faut construire un ouvrage de grande hauteur et il n'est pas sûr que la lave torrentielle puisse encore s'écouler. Les murs et digues de déviation visant à protéger des objets sont principalement mis en œuvre en

7

bordure de localités et au voisinage de points de débordement hors du chenal. La hauteur de la digue de déviation est calculée comme celle de la digue de retenue, la vitesse déterminante étant sa com-

posante perpendiculaire à l'axe de l'ouvrage. Lors du calcul de la hauteur de la digue ou du mur, il y a lieu de prendre en compte les dépôts susceptibles de s'accumuler devant l'ouvrage.

### Etrave



L'étrave permet de protéger un objet tel que bâtiment ou pylône. Elle est érigée contre l'ouvrage menacé ou à proximité immédiate de celui-ci. Elle a pour effet de scinder la masse de matériaux charriés et de l'acheminer de part et d'autre de l'objet à protéger. Son angle d'ouverture ne doit pas dépasser  $60^\circ$ . Les actions qu'elle subit sont décrites dans l'exposé de la situation de danger 2. L'étrave doit être suffisamment haute pour ne pas être submergée. Ce paramètre sera calculé en tenant compte de la hauteur d'écoulement de la lave torrentielle et du nombre de coulées par



épisode pluvieux auxquelles il faut s'attendre. Lorsqu'une étrave se prolonge le long d'un objet menacé sous la forme de murs en L, il n'est pas nécessaire d'appliquer d'autres mesures sur l'objet lui-même. Sinon, il y a lieu de prendre en considération les actions exercées habituellement par la pression et par les frottements sur les parois latérales.

1 **Combinaisons de mesures**

Cette section présente des combinaisons de mesures envisageables dans chaque situation de danger, pour les constructions existantes et pour les nouvelles. Seule la com-

binaison des mesures exposées – qui ont trait à la conception, au renforcement et à l'effet d'écran – permet de réduire efficacement le risque.

2

3

4

5

6

7

Combinaison de mesures		Conception					Renforcement		Effet d'écran			
		Situation de danger	Intégration dans le terrain	Forme du bâtiment	Concept d'utilisation des espaces intérieurs	Position et hauteur des ouvertures	Concept d'utilisation de l'espace extérieur	Parois extérieures	Ouvertures	Digue de retenue	Position surélevée	Mur / digue de déviation
<b>Construction existante</b>												
A	1					•	•	•				
B	1							(•)	•			
C	2							(•)			•	
D	2					•		(•)				•
<b>Nouvelle construction</b>												
E	1		•	•	•	•	•	•				
F	1					•	•		•			
G	1									•		
H	2					•	•				•	
I	2		•	•	•	•	•					•

### Combinaison de mesures A

Les parois extérieures et les ouvertures pratiquées dans la construction existante sont renforcées. Il y a lieu de veiller à l'étanchéité du bâtiment, en particulier de ses ouver-

tures. Les utilisations intensives de l'espace extérieur sont cantonnées dans les secteurs protégés par le bâtiment.

### Combinaisons de mesures B et C

Une digue de retenue ou de déviation protège la construction et ses abords contre l'essentiel du risque occasionné par le débordement d'une lave torrentielle. Les ouvertures pratiquées dans le bâti-

ment sont généralement à l'origine d'un risque résiduel. Il y a lieu de les protéger en conséquence.

### Combinaison de mesures D

L'étrave achemine la masse d'eau et de matériaux rocheux autour de la construction. Les ouvertures pratiquées dans les parois latérales doivent être protégées si elles risquent d'être atteintes par une lave torrentielle. Elles le sont efficace-

ment si l'étrave se prolonge sous la forme de murs en L. L'atteinte au bâtiment est mineure si on laisse un espace entre l'étrave et le bâtiment pour laisser passer la lumière.

### Combinaison de mesures E

Un nouveau bâtiment peut être accommodé d'emblée au danger de lave torrentielle en adaptant le mode de construction. Ce résultat est obtenu en intégrant au mieux le bâtiment dans le terrain, en lui conférant une forme favorable, en adaptant l'utilisation des espaces

intérieurs et extérieurs menacés et en choisissant judicieusement la position des ouvertures et leur hauteur au-dessus du sol. Si l'on s'attend à des pressions élevées, il y a lieu de renforcer les parois extérieures en conséquence.

### Combinaisons de mesures F et H

Une digue de retenue ou de déviation protège la construction et ses abords contre l'essentiel du risque occasionné par le débordement d'une lave torrentielle. Les ouvertures pratiquées dans le bâtiment

sont généralement à l'origine d'un risque résiduel. Celui-ci peut être réduit au minimum en choisissant judicieusement la position des ouvertures et leur hauteur au-dessus du sol.

### Combinaison de mesures G

La mesure consistant à placer un nouveau bâtiment en position haute est économique et très efficace. Le bâtiment est érigé sur un remblai. La route et le chemin d'accès étant inclinés (rampes), la construction n'est pas exposée aux

atteintes directes des laves torrentielles, si bien qu'il n'est pas nécessaire de prévoir d'autres mesures.

### Combinaison de mesures I

La solution consistant à ériger une étrave devant une nouvelle construction tout en agençant les ouvertures et en aménageant les pièces de manière judicieuse offre une protection optimale contre les pressions élevées. L'espace extérieur

restant menacé, il faut prévoir de l'utiliser dans le périmètre protégé par le bâtiment.

1

2

3

4

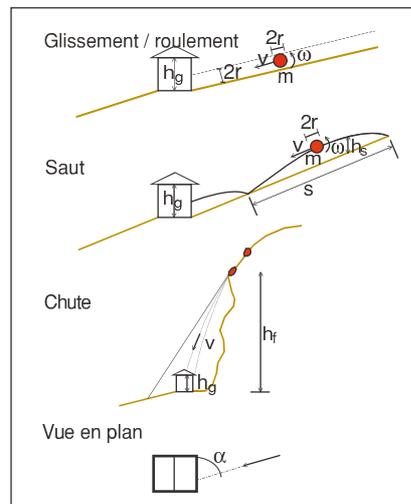
5



6

7

## 1 Notations



2

3

4

5

6

## Notion de composante en mouvement

7

## Caractérisation

- $h_f$  [m] Hauteur de chute libre de la composante en mouvement
- $h_g$  [m] Hauteur du bâtiment
- $h_s$  [m] Hauteur de vol de la composante en mouvement
- $s$  [m] Distance entre deux rebonds de la composante en mouvement
- $r$  [m] Rayon de la sphère équivalente à la composante en mouvement déterminante
- $l_h$  [m] Epaisseur de la paroi en béton armé
- $l_c$  [m] Côté de la section du prisme équivalent à la composante en mouvement déterminante
- $l_w$  [m] Déplacement du cône de poinçonnement pour les parois en béton armé
- $l_d$  [m] Profondeur de pénétration de la sphère équivalente dans la couche de couverture
- $l_e$  [m] Epaisseur de la couche de couverture
- $m$  [t] Masse de la composante en

Par *composante en mouvement*, on entend les pierres (diamètre < 0.5 m) et les blocs (diamètre > 0.5 m) formés de matériaux rocheux ainsi que les masses de glace de taille similaire.

La façon la plus simple de caractériser le phénomène de chute consiste à considérer un corps en chute libre. Le tableau suivant fournit l'énergie de translation de composantes en mouvement de forme sphérique en fonction de leur

mouvement déterminante pour le dimensionnement

$v$  [m/s] Vitesse de la composante en mouvement (vitesse de translation)

$\omega$  [1/s] Rotation propre de la composante en mouvement (vitesse de rotation)

$I$  [t\*m<sup>2</sup>] Moment d'inertie de la masse

$E_{trans}$  [kJ] Energie de translation

$E_{rot}$  [kJ] Energie de rotation

$E_{max}$  [kJ] Energie maximale pouvant être absorbée par les parois en béton armé

$\alpha$  [°] Angle d'incidence dans le plan horizontal, par rapport à l'objet

$\phi$  [°] Angle de frottement interne de la couche de couverture

$M_E$  [kN/m<sup>2</sup>] Module de compressibilité statique de la couche de couverture

$a_s$  [mm<sup>2</sup>/m] Section de l'armature de la paroi en béton armé

$A$  [m<sup>2</sup>] Surface de la charge concentrée à l'origine de l'action (choc)

$C_k$  [-] Coefficient de construction

$C_p$  [-] Coefficient de déformation plastique de la composante en mouvement

$g$  [m/s<sup>2</sup>] Accélération gravitationnelle (10 m/s<sup>2</sup>)

$q_e$  [kN/m<sup>2</sup>] Pression statique de remplacement due à la charge concentrée (choc)

$Q_e$  [kN] Force statique de remplacement due à la charge concentrée (choc)

$R$  [kN] Force de rupture par poinçonnement de la paroi en béton armé

Dans la suite du document, l'expression *chute de pierres* regroupe toutes ces composantes, quelles que soient leur taille et leur nature.

masse (soit du rayon de la sphère équivalente) et de leur vitesse de translation ou de la hauteur de chute libre équivalente. L'énergie de rotation des composantes n'est pas prise en compte dans ce tableau.

**Energie de translation  $E_{trans}$  [kJ] de composantes en mouvement sphériques**

Masse m [t]	Rayon r [m]	Hauteur de chute libre $h_f$ [m]									
		0.3	1	5	12	20	32	46	62	82	
		Vitesse de translation $v$ [m/s]									
		2.5	5	10	15	20	25	30	35	40	
0.001	0.04	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.6	0.8	
0.01	0.10	0.0	0.1	0.5	1	2	3	5	6	8	
0.05	0.16	0.2	0.6	3	6	10	16	23	31	40	
0.10	0.21	0.3	1	5	11	20	31	45	61	80	
0.17	0.25	0.5	2	9	19	34	53	77	104	136	
0.25	0.28	0.8	3	13	28	50	78	113	153	200	
0.50	0.35	2	6	25	56	100	156	225	306	400	
1.00	0.45	3	13	50	113	200	313	450	613	800	
1.40	0.50	4	18	70	158	280	438	630	858	1120	
2.00	0.56	6	25	100	225	400	625	900	1225	1600	
3.00	0.65	9	38	150	338	600	938	1350	1838	2400	
4.00	0.71	13	50	200	450	800	1250	1800	2450	3200	
5.00	0.76	16	63	250	563	1000	1563	2250	3063	4000	
6.00	0.81	19	75	300	675	1200	1875	2700	3675	4800	
7.00	0.86	22	88	350	788	1400	2188	3150	4288	5600	
11.00	1.00	34	138	550	1238	2200	3438	4950	6738	8800	
22.00	1.25	69	275	1100	2475	4400	6875	9900	13475	17600	
38.00	1.50	119	475	1900	4275	7600	11875	17100	23275	30400	

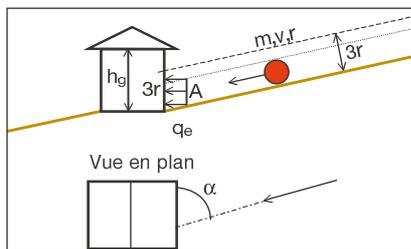
Energie de translation $E_{trans}$	Potentiel de destruction	Capacité d'absorption énergétique d'ouvrages de retenue
De 0 à 10 kJ	Destruction de parois en éléments de bois	Rondins de sapin avec supports en acier
De 10 à 30 kJ	Destruction de parois en rondins de sapin	Bois de chêne avec supports acier Treillis métalliques à simple torsion
De 30 à 100 kJ	Destruction de parois en béton armé épaisses de 0.2 à 0.3 m	Filets simples en câbles d'acier
De 100 à 300 kJ	Destruction de parois en béton armé épaisses de 0.4 à 0.5 m	Filets perfectionnés en câbles d'acier
De 300 à 1000 kJ		Filets en anneaux d'acier avec éléments de freinage
De 1000 à 3000 kJ		Filets spéciaux en anneaux d'acier
Au-delà de 3000 kJ		Digues en sol meuble

**Paramètres d'intensité pour le dimensionnement**

Pour dimensionner les mesures visant à protéger des objets, il faut disposer de données concernant le *mode de mouvement*, la *hauteur de vol*, la *masse* et la *vitesse de translation* des composantes en mouvement. Au lieu de la masse et de l'énergie de translation, il est aussi possible de se baser sur les

*énergies de translation et de rotation* auxquelles il faut s'attendre. Ces données peuvent être tirées des cartes d'intensités et du rapport technique. Si les données concernant les intensités font défaut, elles seront déterminées par un spécialiste des dangers naturels.

## 1 Situation de danger 1

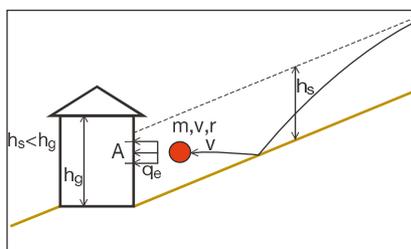


Les composantes en mouvement roulent ou glissent

Les composantes en mouvement s'approchent du bâtiment en roulant ou en glissant. Lorsqu'elles glissent, l'énergie cinétique correspond à la seule énergie de trans-

2

## 3 Situation de danger 2

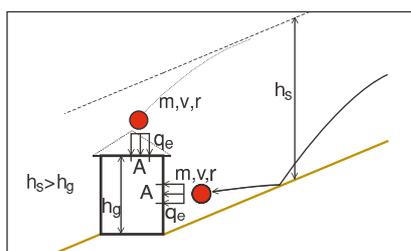


Les composantes en mouvement sautent à une hauteur inférieure ou égale à celle des parois

Les composantes en mouvement s'approchent du bâtiment en rebondissant. L'énergie cinétique se compose de l'énergie de transla-

4

## 5 Situation de danger 3



Les composantes en mouvement tombent ou sautent à une hauteur supérieure à celle des parois

Les composantes en mouvement s'approchent du bâtiment en rebondissant ou en tombant directement sur lui. Lorsqu'elles tombent, l'énergie cinétique correspond à la seule énergie de translation, tandis que l'énergie de rotation intervient également lorsqu'elles rebondissent. La hauteur de vol  $h_s$  ou de chute  $h_f$ , selon le cas considéré, est supérieure à la hauteur du bâti-

7

tion, tandis que l'énergie de rotation intervient également lorsqu'elles roulent. L'action à considérer est la force de choc exercée sur le bâtiment par le corps en mouvement de masse  $m$ . Elle est représentée par une pression statique de remplacement  $q_e$  agissant sur une surface  $A$ . On admet que le choc produit des effets sur les parois sur une hauteur égale à  $3 \cdot r$ , mesurée à partir du niveau du sol. Il y a lieu de déterminer quelles sont les parois touchées, en fonction de l'angle d'incidence  $\alpha$ .

tion et de l'énergie de rotation. La hauteur de vol  $h_s$  est inférieure à la hauteur du bâtiment  $h_g$ , si bien que seules ses parois sont touchées. L'action à considérer est la force de choc exercée sur le bâtiment par le corps en mouvement. Elle est représentée par une pression statique de remplacement  $q_e$  agissant sur une surface  $A$ . On admet que le choc produit des effets entre la surface du sol et la hauteur de vol  $h_s$ . Il y a lieu de déterminer quelles sont les parois touchées, en fonction de l'angle d'incidence  $\alpha$ .

ment  $h_g$ , si bien que les parois ainsi que le toit de la construction sont touchés. L'action à considérer est la force de choc exercée sur le bâtiment par le corps en mouvement. Elle est représentée par une pression statique de remplacement  $q_e$  agissant sur une surface  $A$ . Il y a lieu de déterminer quelles sont les parois touchées, en fonction de l'angle d'incidence  $\alpha$ .

6

Energies de translation et de rotation

Glissement

Lorsqu'une composante en mouvement glisse sur un plan incliné, seule l'énergie de translation intervient. Celle-ci vaut:

$$E_{trans} = 0.5 * m * v^2 \quad [kJ]$$

Energie de translation

Roulement

Lorsqu'une composante en mouvement roule sur un plan incliné, l'énergie de rotation vient s'ajouter à l'énergie de translation. Celle-ci vaut:

$$E_{rot} = 0.5 * I * \omega^2 \quad [kJ]$$

Energie de rotation

$$\text{où } I = 0.4 * m * r^2 \quad [t * m^2]$$

Moment d'inertie de masse d'une sphère

Dans ce cas, on peut admettre sommairement que l'énergie de rotation vaut 20 % de l'énergie totale.

Saut

L'énergie cinétique d'un corps qui saute se compose d'énergie de

translation et de rotation, comme lorsqu'il roule.

Dans ce cas, on peut admettre sommairement que l'énergie de rotation vaut entre 10 % et 20 % au maximum de l'énergie totale. Lors des rebonds (impact au sol, contre un arbre) entre deux phases de vol, une partie de l'énergie cinétique est dissipée du fait de la déformation du sol et des frottements entre le projectile et le sol.

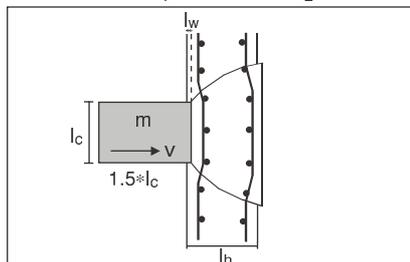
Chute

L'énergie cinétique d'un corps qui tombe comprend uniquement de l'énergie de translation (tableau en début de chapitre). La vitesse atteinte par un corps en chute libre vaut:

$$v = (2 * g * h_f)^{0.5} \quad [m/s]$$

Vitesse de chute libre

Force de choc sur des parois en béton armé dénuées de protection



L'impact d'une pierre ou d'un bloc qui percute une paroi en béton armé à une vitesse comprise entre 2.5 m/s et 40 m/s est considéré comme un choc dur. Un tel choc cause des déformations de la face extérieure et des éclatements sur la face intérieure. C'est généralement le poinçonnement local de la paroi qui est déterminant pour sa rupture.

Le choc dur étant un phénomène complexe, les modes de dimensionnement indiqués ici sont très approximatifs.

Les calculs suivants se basent sur le travail non publié de Tissières (1996). L'action considérée est l'énergie de la composante en mouvement. Seule l'énergie de translation est prise en compte, celle de rotation est négligée.

L'énergie pouvant être absorbée par une paroi en béton armé est égale au produit de la force statique de remplacement  $Q_e$  et du déplacement  $l_w$  du cône de poinçonnement. On admet que la résistance totale de l'armature est atteinte lorsque le déplacement  $l_w$  atteint environ 20 mm. Pour ce déplacement, la force statique de remplacement  $Q_e$  vaut:

$$Q_e = (E_{trans} * C_k * C_p) / l_w = (0.5 * m * v^2 * C_k * C_p) / l_w \quad [kN]$$

Force statique de remplacement due au choc

Le coefficient de construction  $C_k$  tient compte du mode de rupture. Selon le document OFROU (1998), il vaut:

$$C_k = 0.4 \text{ resp. } 0.6 \quad [-]$$

Rupture ductile (p. ex. rupture par flexion de dalles armées)

$$C_k = 1.2 \quad [-]$$

Rupture fragile (p. ex. rupture au poinçonnement d'éléments non armés)

La déformation plastique  $C_p$  subie par la composante en mouvement dissipe une partie de son énergie de translation.

1

2

3

4

5

6

7

Pour les blocs, on admet que cette fraction se monte à environ 15 %.

$$C_p = 0.85 [-]$$

*Coefficient de déformation plastique de la composante en mouvement*

L'énergie maximale  $E_{max}$  pouvant être absorbée par des parois en béton armé sans armature d'effort et leur force de rupture  $R$  sont présentées ci-après pour des parois de différentes épaisseurs  $l_h$  et pour différents pourcentages d'armature  $a_s$ . On considère que le bloc inci-

dent a la forme d'un prisme carré de côté  $l_c$  et de hauteur égale à  $1.5 \cdot l_c$ . Dans l'hypothèse d'un mode de rupture fragile, on obtient les valeurs suivantes pour l'énergie maximale pouvant être absorbée et pour la force de rupture, dans les deux cas de l'armature interne seule et de la combinaison des armatures interne et externe (béton B 35/25, acier S500,  $C_k = 1.2$ ,  $\gamma_R = 1.0$ ,  $\gamma_R = 1.0$ . Calcul Jörg Rutz, GVA St. Gallen):

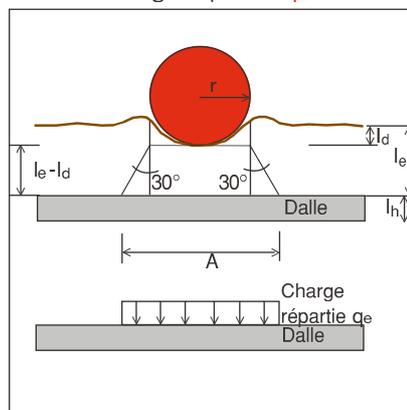
Section de l'armature $a_s$ [mm <sup>2</sup> /m]	Epaisseur de la paroi $l_h$ [m]	Masse du bloc incident $m$ [t]	Force de rupture $R$ [kN]		Energie maximum absorbable $E_{max}$ [kJ]	
			armature interne seulement	armature interne et externe	armature interne seulement	armature interne et externe
			393	0.2	0.1	780
	0.2	0.5	1150	1590	23	32
	0.2	1.0	1390	1930	28	39
754	0.2	0.1	1080	1560	22	31
	0.2	0.5	1600	2430	32	49
	0.2	1.0	1920	2960	38	59
	0.3	0.1	1630	2110	33	42
	0.3	0.5	2280	3110	46	62
	0.3	1.0	2680	3730	54	75
	0.4	0.1	2270	2750	45	55
	0.4	0.5	3060	3890	61	78
	0.4	1.0	3550	4590	71	92
1340	0.2	0.1	1570	2430	31	49
	0.2	0.5	2310	3790	46	76
	0.2	1.0	2770	4630	55	93
	0.3	0.1	2220	3080	44	62
	0.3	0.5	3100	4580	62	92
	0.3	1.0	3650	5500	73	110
	0.4	0.1	2980	3830	60	77
	0.4	0.5	3990	5470	80	109
	0.4	1.0	4620	6480	92	130
2010	0.3	0.1	2910	4190	58	84
	0.3	0.5	4050	6260	81	125
	0.3	1.0	4750	7540	95	151
	0.4	0.1	3790	5070	76	101
	0.4	0.5	5060	7270	101	145
	0.4	1.0	5850	8630	117	173

Pour des périodes de récurrence inférieures à 30 ans, on peut exiger que l'impact ne produise pas d'éclatement du béton sur la face intérieure de la paroi, afin de s'assurer que l'ouvrage reste apte au service après l'événement.

Cette vérification sera réalisée par exemple selon Brown/Perry (in CEB 1988). Il s'avère qu'on n'évite pas ces éclatements en renforçant l'armature, mais en augmentant l'épaisseur de la paroi.

Force de choc sur des surfaces en béton armé recouvertes de sol meuble

De nombreux essais ont permis d'élaborer une procédure de dimensionnement pour les structures porteuses en béton recouvertes de sol meuble (OFROU 1998). La force statique de remplacement est décrite par l'effet d'un corps équivalent de forme sphérique et de masse  $m$ . On admet que la couche de couverture génère une répartition des charges selon un angle de  $30^\circ$ . La charge répartie  $q_e$  à utiliser



pour le dimensionnement est considérée comme constante sur sa surface d'influence. La couverture doit avoir une épaisseur  $l_e$  supérieure au double de la profondeur de pénétration du projectile  $l_d$  et en tout cas supérieure à 0.5 m. La force statique de remplacement  $Q_e$  et la profondeur de pénétration  $l_d$  sont calculées comme suit:

$$Q_e = 2.8 * C_k * l_e^{-0.5} * r^{0.7} * M_E^{0.4} * \tan \varphi * (0.5 * m * v^2)^{0.6}$$

$$l_d = m * v^2 / Q_e$$

### 1 Intégration dans le terrain



Les bâtiments bien intégrés dans le terrain sont protégés contre les impacts directs des chutes de pierres. Lorsque les composantes en mouvement roulent ou glissent, ce résultat est atteint en plaçant le corps du bâtiment en position

haute. Ainsi, on peut minimiser la surface directement menacée de la paroi extérieure. Lorsque les composantes en mouvement sautent, on choisira plutôt de placer le bâtiment en position basse, ce qui permet de réduire la surface de la paroi extérieure amont à protéger.

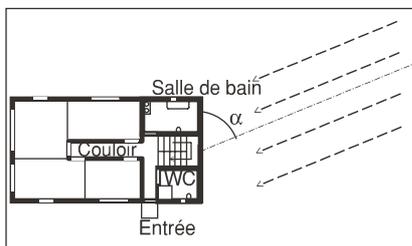
2

### 3 Forme et concept statique du bâtiment

Le front du bâtiment exposé aux chutes de pierres aura une faible largeur. La probabilité qu'il soit atteint s'en trouvera réduite. Les structures porteuses de l'ouvrage seront disposées en tenant compte

de la direction des chutes de pierres, de manière à ce qu'elles soient protégées contre elles. On les réalisera en préférant des dalles et des voiles porteuses à une construction à ossature.

### 4 Concept d'utilisation des espaces intérieurs



Une utilisation judicieuse des espaces intérieurs permet de réduire le risque encouru par les personnes séjournant dans le bâtiment. On disposera des pièces généralement occupées pour de brèves durées, telles que couloirs de liaison ou salles d'eau, au voisinage de la paroi extérieure directement menacée.

5

### Position des ouvertures

Les ouvertures pratiquées dans le bâtiment, telles que portes ou fenêtres, sont les points les plus vulnérables vis-à-vis de l'action des chutes de pierres. C'est pourquoi il faut éviter de placer des fenêtres dans la paroi extérieure exposée aux chutes de pierres, ou sinon leur conférer une très petite taille. De telles ouvertures doivent être ren-

forcées dans tous les cas (cf. ci-dessous). Les entrées situées sur le côté exposé aux chutes de pierres ne peuvent être autorisées qu'exceptionnellement, pour autant que le motif de cet agencement soit bien fondé et qu'elles soient protégées en permanence par des mesures adéquates.

6

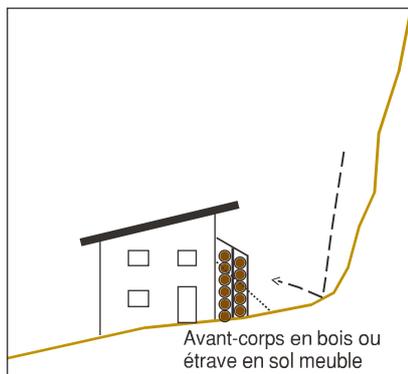
### Concept d'utilisation de l'espace extérieur

Les utilisations de l'espace extérieur impliquant un séjour prolongé seront cantonnées dans les secteurs protégés par le bâtiment. C'est pourquoi on placera les balcons et les terrasses dans l'espace à l'abri des chutes de pierres.

On veillera également à ce que les routes et chemins d'accès au bâtiment empruntent des passages protégés.

7

Coffrage des parois



Coffrage

L'application de coffrages composés de matériaux amortisseurs contre les parois est une mesure très efficace. Un élément porteur

équipé de la sorte est protégé dans une large mesure contre les actions directes. La couche d'amortissement a pour but de réduire la force de poussée générée par la pierre. On y parvient en absorbant cette force sur une distance de déformation la plus longue possible.

Le bois et certains matériaux synthétiques peuvent être utilisés comme amortisseurs.

Des avant-corps en rondins offrent des solutions harmonieuses au plan architectural. Leur capacité d'amortissement est la suivante:

Diamètre des rondins	Type de bois	Résistance à la rupture [kJ]
0.20 m	Epicéa	1.5
0.20 m	Erable	2
0.20 m	If	5
0.50 m	Epicéa	9
0.50 m	Erable	15
0.50 m	If	30
1.00 m	Epicéa	35
1.00 m	Erable	50
1.00 m	If	120



Lorsque l'énergie des composantes en mouvement est faible, une pile de bois peut jouer le rôle de dispositif amortisseur en vue de protéger une paroi.

### 1 Remblai / renforcement des parois

#### Remblai

Une autre possibilité pour protéger les parois extérieures sensibles aux chocs consiste à ériger un remblai de terrain meuble devant elles. L'excellente capacité d'amortissement offerte par les matériaux terreux permet de maîtriser des énergies de chute très élevées. L'inconvénient du remblai réside dans le fait qu'il nécessite beaucoup plus de place que les autres solutions lorsque les parois à protéger sont hautes. Mais on peut pallier cet inconvénient en érigeant des constructions très raides en sol meuble armé de géotextile.

#### Renforcement des parois

Dans les nouveaux bâtiments, il est possible de renforcer les parois en béton armé en augmentant le pourcentage d'armature. On peut également accroître l'épaisseur des parois, mais cette solution est peu économique. La capacité d'absorption d'énergie augmente faiblement en regard du supplément de coût occasionné par le surcroît de matériaux.

Dans les bâtiments existants, les

parois sont renforcées en collant une armature de lamelles d'acier ou en ajoutant une armature supplémentaire au sein d'une couche de gunité ou de béton de parement. Les lamelles d'acier, caractérisées par une large zone de plastification, offrent une importante capacité d'absorption d'énergie dans le domaine plastique. Elles sont disposées verticalement – du sol au plafond – pour limiter leur longueur. En règle générale, les ancrages mécaniques (en effort tranchant ou en traction) doivent être dimensionnés pour la totalité de la force de rupture en traction des lamelles. Le béton rajouté doit avoir une résistance à l'arrachement d'au moins  $2.0 \text{ N/mm}^2$ . S'agissant des actions causées par les pierres et les blocs, il faut que les lamelles soient peu espacées afin de prévenir le phénomène de poinçonnement.

Pour que ces mesures de renforcement déploient toute leur efficacité, il est important que la surface du béton soit rendue bien rugueuse au préalable.

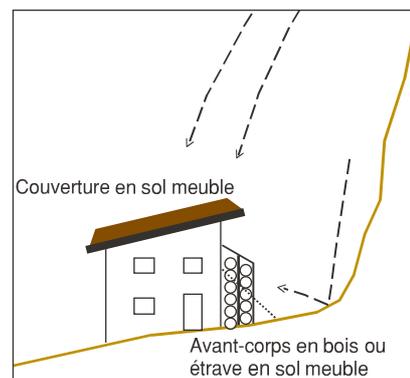
### 5 Protection des ouvertures

Les fenêtres peuvent être protégées par des croisillons en acier. L'espacement entre la vitre et les croisillons doit être assez grand pour que ces derniers disposent d'une distance de déformation suffisante.

Les portes menacées seront protégées contre l'action des pierres par des murs ou des digues localisées.

### 6 Renforcement du toit / pose d'une couche de couverture

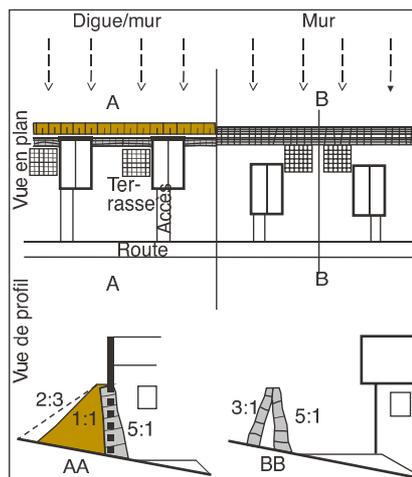
La pose d'une couverture en sol meuble permet de protéger les surfaces de toitures de manière optimale. Le type de construction qui se prête le mieux à cette mesure est un toit légèrement incliné. Le dimensionnement peut être réalisé en appliquant les mêmes critères que pour la procédure spécialement développée à l'intention des galeries de protection contre les chutes de pierres (OFROU, 1998).



Certaines mesures à effet d'écran exercent une influence déterminante sur la propagation des phénomènes dangereux. Des mesures de ce type ne peuvent être appliquées que si leur mise en œuvre ne provoque aucune augmen-

tation de la menace pesant sur les objets voisins. Le symbole  attire l'attention sur ce problème.

Digue / mur de retenue



Les digues en sol meuble permettent de reprendre des énergies de chute supérieures à 3000 kJ. Elles constituent donc la mesure la plus efficace pour absorber l'énergie des chutes de pierres. Leur mise en œuvre est cependant limitée par leur emprise au sol. Leur base requiert notamment une surface importante lorsqu'elles visent à retenir des composantes en mouvement qui sautent à une grande hauteur.

Mais cet inconvénient peut être limité en optant pour un mode de construction très raide sur un ou sur les deux versants de la digue. A cet effet, on appliquera de préférence des techniques à base de blocs, gabions ou géotextiles.



Filet en câble d'acier



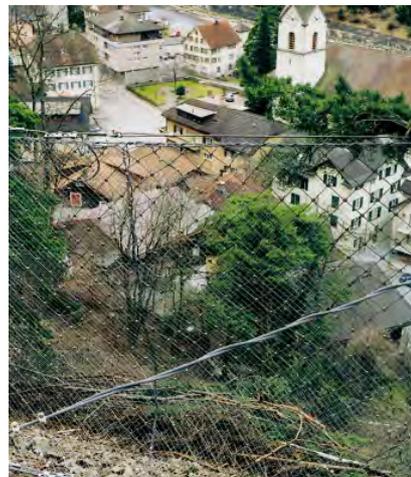
Le domaine des filets en câbles d'acier a connu une avancée remarquable au cours des 15 dernières années. Jusque vers le milieu des années quatre-vingt, les filets de protection étaient capables

d'absorber des énergies de l'ordre de 200 kJ. Mais la mise en œuvre de nouveaux systèmes (filets en anneaux d'acier) a permis de porter la limite à 3000 kJ. Les filets de protection sont dimensionnés en fonction de leur homologation selon la directive émise par l'OFEFP en 2001 (OFEFP, 2001). L'examen porte sur des filets répartis en 9 classes d'énergie, de 100 kJ à 5000 kJ. Pour dimensionner les fondations et les ancrages, les forces maximales mesurées lors de

1

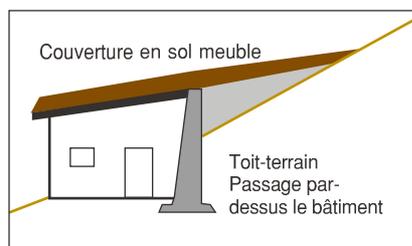
l'examen sont majorées de 30 %, puis ces forces de remplacement sont introduites dans les calculs au titre de valeurs caractéristiques  $F_k$ , selon la norme SIA 260, chiffre 3.2.2.2.

2



3

### Toit-terrain →



On nomme toit-terrain une construction dont le toit est raccordé sans discontinuité au terrain naturel ou à un remblai du côté amont. Ainsi, les pierres passent par-dessus le bâtiment. Une solution spécifique doit être trouvée pour

les cheminées (p. ex. construction légère amovible). La charge statique est comparable à celle qui agit sur les toits recouverts de sol meuble (cf. ci-dessus). Cette mesure n'est intéressante que pour les constructions isolées dont l'espace extérieur est peu exploité. Mais si le bâtiment est bien protégé, ses alentours restent menacés. Comme il dévie la trajectoire des pierres, il est susceptible d'accroître le danger pesant sur des objets voisins.

4

5

### Stabilisation

Lorsque la zone de rupture à l'origine de la menace sur un objet est peu étendue et située à proximité immédiate de cet objet, il y a lieu d'accorder une grande importance aux mesures visant à stabiliser la source des chutes de pierres.

#### a) Revêtement / végétation

La pose d'un revêtement ou de végétation a pour but de protéger la surface contre l'altération météorologique. Dans la mesure du possible, on garnira les pentes rocheuses d'herbe et de plantes. Dans les pentes raides, il y a lieu d'appliquer une combinaison de géotextile, de filets de câble et de béton projeté, complétés par des ancrages ou des clous, en raison de l'érosion superficielle.



#### b) Treillis pare-pierres

Les treillis pare-pierres permettent de capturer les pierres qui se détachent individuellement, les empêcher de rebondir et les acheminer sous contrôle jusqu'au pied de la pente. Cette technique est notamment appropriée pour les falaises de poudingue soumises à l'altération.

6

7

Les treillis sont constitués de câbles zingués ou de plastique noué. Ils sont montés à 0.3-0.4 m de la surface rocheuse, afin d'éviter que des pierres détachées se prennent dans le treillis et forment des accumulations susceptibles de l'endommager.



*c) Ouvrages de soutènement / ancrages*

On peut améliorer la stabilité interne des compartiments rocheux surplombants ou évidés à la base en les soutenant par des piliers en béton ou en acier. Si l'on érige plusieurs piliers, il est recommandé de les relier par un sommier constitué d'une poutre horizontale en béton armé.

Les pentes verticales de petite taille peuvent être confortées au moyen de murs de soutènement de diverses natures. Ils servent à accroître la stabilité au glissement et au renversement ou à réduire l'altérabilité de la pente.

La stabilité interne de blocs individuels ou de secteurs de pentes peut être améliorée en disposant des ancrages dans la roche. On se référera à la norme SIA 267 (Géotechnique) en ce qui concerne le dimensionnement des ancrages et leur protection contre la corrosion.

*d) Diminution de la pente*

Le danger potentiel occasionné par les petites pentes rocheuses peut être réduit en leur conférant une déclivité inférieure à 40°. Il faut cependant tenir compte du fait que l'altération est plus active dans ces pentes dont la structure a été modifiée en surface.

*e) Drainage*

Les drainages sont destinés à évacuer les eaux superficielles percolant dans la pente et à drainer les eaux profondes circulant dans la roche. Cette mesure a pour effet de ralentir les processus d'altération naturels. Elle est mise en œuvre en combinaison avec d'autres mesures de stabilisation.

*f) Purge des parois rocheuses*

On entend par purge des parois rocheuses le fait d'ôter les pierres et blocs menaçant de tomber. L'effet de cette mesure est généralement limité dans le temps, car l'érosion poursuit son action. La purge doit être effectuée en appliquant un procédé ménageant les falaises. Il est fréquemment nécessaire d'ôter les pierres et blocs à la main pour satisfaire à cette condition. Pendant les purges périodiques, il y a lieu d'ordonner des mesures de protection temporaires dans la zone menacée par les chutes de pierres.

1 **Combinaisons de mesures**

Cette section présente des combinaisons de mesures envisageables dans chaque situation de danger, pour les constructions existantes et pour les nouvelles. Seule la combinaison des mesures exposées –

qui ont trait à la conception, au coffrage / renforcement et à l'effet d'écran / stabilisation – permet de réduire efficacement le risque.

2

3

4

5

6

7

		Conception					Coffrage Renforcement			Effet d'écran Stabilisation			
Combinaison de mesures	Situation de danger	Intégration dans le terrain	Forme / concept statique	Concept d'utilisation des espaces intérieurs	Position des ouvertures	Concept d'utilisation de l'espace extérieur	Parois extérieures	Ouvertures	Toit	Digue / mur de retenue	Filet pare-pierres	Toit-terrain 	Stabilisation
		<b>Construction existante</b>											
A	1					•	•	(•)					
B	1					•				•			
C	1					•					•		
D	2					•	•	•					
E	2					•				•			
F	2					•					•		
G	3					•	•	•	•				
H	1/2/3					•							•
<b>Nouvelle construction</b>													
I	1	•	•	•	•	•	•	(•)					
J	1				•	•				•			
K	1				•	•					•		
L	2	•	•	•	•	•	•	•					
M	2	•		•	•	•				•			
N	2	•		•	•	•					•		
O	3	•	•	•	•	•	•	•	•				
P	3	•	•	•	•	•	•		•			•	
Q	1/2/3				•	•							•

### Combinaison de mesures A

La construction existante se trouve dans la zone de dépôt d'une source de chutes de pierres et elle est menacée par des pierres qui roulent ou glissent. Le risque régnant à l'intérieur du bâtiment peut être réduit en renforçant les parois exposées ou en appliquant un coffrage

amortisseur sur les surfaces extérieures exposées et en protégeant les éventuelles ouvertures au moyen de croisillons. Les espaces extérieurs utilisés intensivement seront aménagés en un lieu protégé par le bâtiment.

### Combinaisons de mesures B et C

La réduction du risque est obtenue en érigeant une digue, un mur de retenue ou un filet pare-pierres. Aucune autre mesure n'est nécessaire sur le bâtiment lui-même, ni aux

alentours dans le périmètre sécurisé par l'ouvrage de protection. Seuls les espaces extérieurs restés sans protection seront utilisés en fonction du danger.

### Combinaison de mesures D

Les mesures préconisées sont les mêmes que dans la variante A. Mais comme les pierres sautent, les mesures doivent être mises en œuvre notablement plus haut sur le bâtiment.

### Combinaisons de mesures E et F

Les mesures préconisées sont les mêmes que dans la variante B. Mais la digue, le mur de retenue ou le filet pare-pierres doit être suffisamment haut pour capturer les pierres qui sautent. On ne peut ja-

mais exclure tout danger résiduel dû à des trajectoires très élevées. Les espaces – extérieurs tout au moins – seront utilisés en fonction de ce danger résiduel.

### Combinaison de mesures G

Le bâtiment existant est menacé par des composantes en mouvement qui tombent ou sautent à une hauteur supérieure à celle de la construction. Le toit, les parois extérieures et les ouvertures concernées sont renforcés et surtout

équipés d'un coffrage amortisseur. L'espace extérieur n'étant pas protégé par le bâtiment, il doit être utilisé le moins possible.

### Combinaison de mesures H

La zone de rupture à l'origine des chutes de pierres, peu étendue et située à proximité immédiate de l'objet menacé, peut être confortée par des travaux de stabilisation.

Aucune mesure n'est nécessaire sur l'objet lui-même. Si un danger résiduel subsiste, l'espace extérieur soumis aux chutes de pierres sera utilisé le moins possible.

### Combinaison de mesures I

La nouvelle construction est adaptée d'emblée à la menace occasionnée par des composantes en mouvement qui roulent ou glissent. Ce résultat est obtenu en surélevant le corps du bâtiment et en adaptant l'affectation des pièces dans la partie exposée du rez-de-chaussée. Il faut éviter de pratiquer des ouvertures dans le secteur

menacé, ou sinon leur conférer une petite taille. Les parois extérieures exposées sont renforcées ou flanquées, par exemple, d'une construction en rondins. L'affectation de l'espace extérieur sera planifiée d'emblée pour se concentrer dans les aires protégées.

### 1 Combinaisons de mesures J et K

Ces mesures sont sensiblement les mêmes que pour les constructions existantes (combinaisons B et C). Seules les ouvertures pratiquées

dans les parois extérieures exposées du rez-de-chaussée sont adaptées pour réduire encore le risque résiduel.

### 2 Combinaison de mesures L

La nouvelle construction est menacée par des composantes en mouvement qui sautent. La surface des parois extérieures menacées est réduite en plaçant le corps du bâtiment en position basse et en lui conférant un front de faible largeur. Il faut éviter de pratiquer des ouvertures dans le secteur susceptible

d'être affecté par les chutes de pierres, ou sinon leur conférer une petite taille. Les parois extérieures menacées sont renforcées ou flanquées, par exemple, d'une construction en rondins. L'affectation de l'espace extérieur sera planifiée d'emblée pour se concentrer dans les aires protégées.

### 3 Combinaisons de mesures M et N

La plus grande partie du risque est jugulée en érigeant une digue, un mur de retenue ou un filet en câbles d'acier. Il faut prévoir de réduire encore le risque pour le cas où des composantes en mouve-

ment franchiraient les ouvrages de protection. Ce résultat est obtenu en adaptant le concept d'utilisation des espaces intérieurs et de l'espace extérieur.

### 4 Combinaisons de mesures O et P

La nouvelle construction est menacée dans le périmètre des parois externes et du toit. Les mesures de protection correspondant à la combinaison L sont mises en œuvre. Le toit est en outre protégé par la pose

d'une couche d'amortissement en sol meuble. L'action sur les parois extérieures est notablement réduite si le bâtiment revêt la forme de toit-terrain.

### 5 Combinaison de mesures Q

La zone de rupture à l'origine des chutes de pierres, peu étendue et située à proximité immédiate de l'objet menacé, peut être confortée par des travaux de stabilisation. Si un danger résiduel subsiste, l'espace extérieur soumis aux chutes de pierres sera utilisé le moins possible et les ouvertures pratiquées dans les parois extérieures affectées auront une petite taille.

6

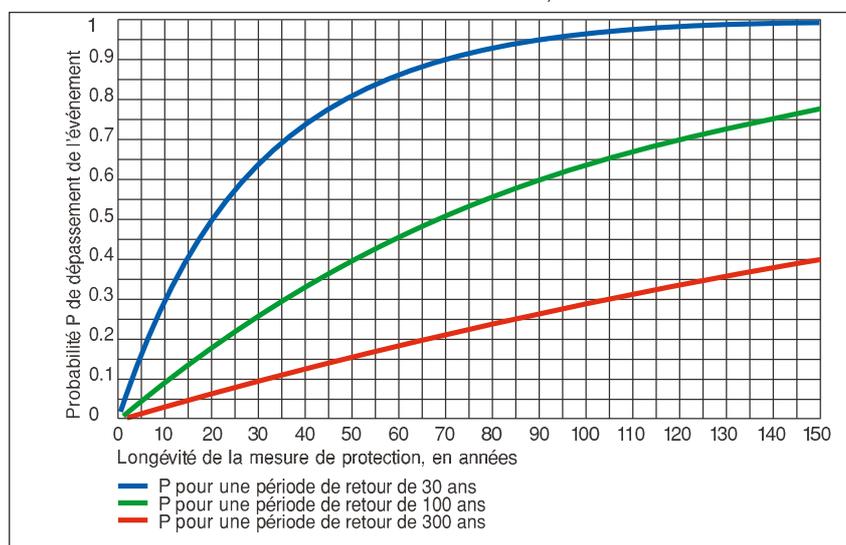
7

Efficacité en termes de  
réduction du risque

L'efficacité des mesures mises en œuvre pour protéger des objets est calculée en fonction de la réduction du risque qu'elles permettent d'obtenir. Pour déterminer ce paramètre, il faut évaluer l'ampleur des dommages corporels et matériels évités grâce à ces mesures. Une méthode de calcul du rapport coût-efficacité applicable aux biens est décrite ci-après.

Les mesures de protection des objets ont une longévité limitée. C'est pourquoi la probabilité

d'occurrence d'un événement ne peut pas être déterminée en appliquant sans autre sa période de retour, car celle-ci fournit une valeur moyenne pour une durée illimitée. La probabilité d'occurrence d'un événement au cours d'une période de référence est calculée en appliquant la formule  $P = 1 - (1 - 1/T)^n$ , où P représente la probabilité de dépassement de la crue dont la période de retour est égale à T pendant la longévité n de la mesure de protection considérée (fig. ci-dessous).



Exemple:

Un aménagement de cours d'eau vise à protéger une fabrique contre les crues de débit inférieur ou égal à celui de la crue trentennale (période de retour de 30 ans, HQ 30). Si ce débit est légèrement dépassé, lors d'une crue cinquennale (HQ 50), la fabrique subit des dégâts pour un montant de 30'000 CHF, tandis que la facture sera de 150'000 CHF pour une crue centennale (HQ 100) et augmentera progressivement pour les événements encore plus rares, selon le tableau ci-après. Considérons maintenant la rentabilité d'un ouvrage de longévité égale à 20 ans qui vise à protéger cette fabrique. Dans ce cas, la probabilité qu'elle subisse des dégâts occasionnés par une crue (HQ > HQ 30 au cours d'une période de 20 ans) est de 49 %, la probabilité que le montant des dégâts soit

supérieur à 30'000 CHF (HQ 50) est de 33 % et la probabilité que la facture dépasse les 150'000 CHF (HQ 100) est de 18 %. Si l'on protège la fabrique contre la crue cinquennale (HQ 50), on empêche donc la survenance de dégâts pour un montant de 0 à 30'000 CHF (moyenne = 15'000 CHF) dont la probabilité d'occurrence est de 16 %. En effet, la probabilité qu'aucun événement ne provoque des dégâts est égale à 51 % et la probabilité que survienne un événement dommageable, supérieur à la crue cinquennale (HQ 50) contre laquelle la mesure de protection considérée est inefficace, est égale à 33 %. Ces valeurs s'appliquent à l'ensemble de la période. Comme le moment où un événement se produit est inconnu, elles sont réparties régulièrement sur la période de référence de 20 ans.

© 2005 VKF/AEAI

Exemple de calcul du montant annuel moyen des dégâts attendus:

1	Période de retour T	Montant des dégâts S (CHF)	Probabilité P	Delta P	Montant moyen dégâts MS (CHF)	Efficacité E = Delta P * MS	Efficacité E par an	Somation de l'efficacité par an
	30	0	0.49					0
	50	30'000	0.33	0.16	15'000	2'400	120	120
	100	150'000	0.18	0.15	90'000	13'500	675	795
	300	180'000	0.06	0.12	165'000	19'800	990	1785
	1000	200'000	0.02	0.04	190'000	7'600	380	2165

2

Selon cette logique, une protection contre la crue centennale (HQ 100) ne doit pas coûter plus de 795 CHF/an.

Ce montant peut être augmenté selon le tableau si l'on fixe des objectifs de protection plus élevés.

3

*Dépenses pour les constructions existantes*

Il y a lieu d'évaluer soigneusement l'efficacité économique des mesures visant à protéger les bâtiments existants. Elles seront appréciées en fonction du type, de l'âge et de l'état du bâtiment, ainsi que des matériaux utilisés pour sa construction. La méthode décrite précédemment permet de mettre en regard l'efficacité annuelle des mesures et leur coût annuel. Le rapport coût-efficacité optimal sera déterminé en appliquant différentes périodes de retour.

*Conversion du coût d'investissement en coût annuel*

Le coût I investi pour réaliser une mesure de protection doit être converti en coût annuel pour qu'il puisse être mis en regard de l'efficacité de la mesure, c'est-à-dire de la réduction du risque qu'elle permet d'obtenir. Selon la longévité de la mesure mise en œuvre et le taux d'intérêt appliqué, on obtient les facteurs k de récupération du capital suivants:

4

**Tableau des facteurs k de récupération du capital:**

Taux d'intérêt %	Longévité			
	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
2	0.11133	0.06116	0.03182	0.02320
3	0.11723	0.06722	0.03887	0.03165
5	0.12950	0.08024	0.05478	0.05038
6	0.13578	0.08718	0.06344	0.06018
8	0.14903	0.10185	0.08174	0.08004

5

*Exemple*

Investissement I = 10'000 CHF, longévité de 20 ans, taux d'intérêt de 3 %. Le coût annuel se calcule comme suit:

$$\text{Coût} = (I * k) = 10'000 \text{ CHF} * 0.06722 = 672 \text{ CHF}$$

6

Rapport coût-efficacité

7

L'efficacité de la mesure considérée, calculée sur un an, est maintenant comparée à son coût annuel en établissant un rapport coût-efficacité. Si ce rapport est inférieur à 1, l'investissement est considéré comme rentable.

Dans l'exemple ci-dessus, on obtient: rapport coût / efficacité = 672 CHF / 795 CHF = 0.85.

Cela signifie que la mesure de pro-

tection considérée se justifie parfaitement au plan strictement économique. Si l'on considère également les coûts imputables à des interruptions d'exploitation ou à d'autres facteurs difficilement quantifiables (perturbations d'ordre général, etc.), l'efficacité économique de cet investissement est encore meilleure.

## Bibliographie choisie

*Généralités*

Norme SIA 260 (2003):  
Bases pour l'élaboration des  
projets de structures porteuses.  
Société suisse des ingénieurs et  
des architectes, Zurich.

Norme SIA 261 (2003):  
Actions sur les structures  
porteuses. Société suisse des ingé-  
nieurs et des architectes, Zurich.

Norme SIA 261/1 (2003):  
Actions sur les structures  
porteuses: Spécifications complé-  
mentaires. Société suisse des ingé-  
nieurs et des architectes, Zurich.

Norme SIA 465 (1998): Sécurité  
des ouvrages et des installations.  
Société suisse des ingénieurs et  
des architectes, Zurich.

SSIGE (2001): Directives pour  
conduites de gaz. Directive G2,  
Société suisse de l'industrie du gaz  
et des eaux, Zurich.

SSIGE (2004): Directives pour  
l'étude, la construction, l'exploita-  
tion et l'entretien des réseaux d'eau  
potable à l'extérieur des bâtiments.  
Directive W4, Société suisse de  
l'industrie du gaz et des eaux,  
Zurich.

*Avalanches*

GVA (1994): Vorschriften für bauli-  
che Massnahmen an Bauten in der  
blauen Lawinenzone. Gebäude-  
versicherungsanstalt des Kantons  
Graubünden.

Leuenberger, F. (2003): Bauan-  
leitung Gleitschneeschutz und tem-  
porärer Stützverbau, Eidg. Institut  
für Schnee- und Lawinenforschung  
SLF, Davos.

OFEFP, WSL (1990/2000):  
Directives pour la construction  
d'ouvrages paravalanches dans  
la zone de décrochement, Office  
fédéral de l'environnement, des fo-  
rêts et du paysage, Berne / Institut

fédéral pour l'étude de la neige et  
des avalanches, Davos.

OFF (1984): Directives pour la prise  
en considération du danger d'ava-  
lanches lors de l'exercice d'acti-  
vités touchant l'organisation du  
territoire. Office fédéral des forêts/  
Institut fédéral pour l'étude de la  
neige et des avalanches,  
OFCL, Berne.

OFROU (1994): Directive: Actions  
sur les galeries de protection con-  
tre les avalanches. Office fédéral  
des routes / Direction des travaux  
DG CFF, OFCL, Berne.

Salm, B. et al. (1990): Berechnung  
von Fließlawinen. Eine Anleitung  
für Praktiker mit Beispielen. Mit-  
teilung Nr. 47, Eidg. Institut für  
Schnee- und Lawinenforschung,  
Davos.

*Crues et laves torrentielles*

AEAI, OFEG (2004): Aide à la  
décision: Protection mobile contre  
les crues. Association des établis-  
sements cantonaux d'assurance  
incendie, Berne / Office fédéral des  
eaux et de la géologie, Bienne.

Böll, A. (1997): Wildbach- und  
Hangverbau. Bericht Nr. 343, Eidg.  
Forschungsanstalt für Wald,  
Schnee und Landschaft,  
Birmensdorf.

CIPR (2002): Prévention du risque  
de dommages liés aux inondations:  
Mesures générales et leur effica-  
cité. Commission internationale  
pour la protection du Rhin,  
Coblence.

Egli, Th. (1996): Hochwasserschutz  
und Raumplanung. ORL-Bericht  
Nr. 100, vdf Hochschulverlag an  
der ETH, Zürich.

FEMA (1986a): Floodproofing Non-  
Residential Structures. Publication  
No. 102, Federal Emergency  
Management Agency, Washington  
D.C.

1

FEMA (1986b): Retrofitting Flood-prone Residential Structures. Publication No. 114, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.

Verhalten von Böden und Fels und die wichtigsten grundbaulichen Konzepte, 6. Auflage, Springer Verlag, Berlin.

2

GEO (2000): Review of Natural Terrain Landslide Debris-Resisting Barrier Design. Geotechnical Engineering Office, Geo Report No. 104, Civil Engineering Department, the Government of the Hong Kong Special Administrative Region.

OFEFP, OFEE, OFAT (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'environnement, des forêts et du paysage / Office fédéral de l'économie des eaux / Office fédéral de l'aménagement du territoire, OFCL, Berne.

3

Kohli, A. (1998): Kolk an Gebäuden in Überschwemmungsebenen. Mitteilung Nr. 157, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH, Zürich.

Smolczyk, U. [Hrsg.] (1990): Grundbau Taschenbuch. Teil 1, Grundlagen, Ernst und Sohn, Berlin.

4

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 / Office fédéral de l'aménagement du territoire / Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, OFCL, Berne.

Smolczyk, U. [Hrsg.] (1992): Grundbau Taschenbuch. Teil 3, Grundbauwerke, Ernst und Sohn, Berlin.

5

Rickenmann, D. (1995): Beurteilung von Murgängen. Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 48, Zürich.

Veder, Ch. (1979): Rutschungen und ihre Sanierung. Springer Verlag, Wien / New York.

USACE (1992): Flood Proofing Regulations. US Army Corps of Engineers, Publication No. 1165-2-314, US Government Printing Office, Washington.

*Chutes de pierres et de blocs*  
CEB (1988): Concrete Structures under Impact and Impulsive Loading. Synthesis Report, Comité Euro-International du béton, Lausanne.

6

VDI (2004): Schutz der Technischen Gebäudeausrüstung – Hochwasser. Verein Deutscher Ingenieure, VDI Richtlinie 6004, Düsseldorf.

Gerber, W. et al. (1995): Schutzmassnahmen gegen Steinschlag. FAN-Kurs 1995, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf.

7

### *Glissements de terrain*

Groupe de travail Danger naturel et géologie (1998): Dangers géologiques en Suisse. Tiré à part du Bulletin de géologie appliquée 3/1, ISSN 1420-6846.

Heierli et al. (1985): Schutz gegen Steinschlag. Forschungsarbeit 21/83 auf Antrag der Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, 2. Auflage, Bundesamt für Strassenbau, Bern.

Lang, H.-J. et al. (1996): Bodenmechanik und Grundbau. Das

OFEFP (2001): Directive sur l'homologation de filets de protection contre les chutes de pierres. Office fédéral de l'environnement,

des forêts et du paysage, Berne /  
Institut fédéral de recherches sur la  
forêt, la neige et le paysage,  
Birmensdorf.

OFEFP, OFEE, OFAT (1997): cf.  
ci-dessus.

OFROU (1998): Directive: Actions  
sur les galeries de protection contre  
les chutes de pierres. Office  
fédéral des routes / Direction des  
travaux CFF, OFCL, Berne.

Tissières, P. (1996): Résistance  
d'un mur d'habitation à l'impact  
d'un bloc. Rapport à l'intention du  
Service des routes et cours d'eau,  
Géologue cantonal, non publié,  
Martigny.

Liens  
[www.vkf.ch](http://www.vkf.ch)  
[www.planat.ch](http://www.planat.ch)

1

2

3

4

5

6

7







