



Janvier 2013 / Stéphane Losey

SilvaProtect-CH: Modélisation des processus

Annexe 1



(Photo: canton de St-Gall, Andreas Aschwanden, 2003)

Documents utilisés

Documents (D)	Date	Auteur	Utilisation
SilvaProtect-CH – MNT10 – Documentation	01.11.2005	B. Schneider	Chapitre 2
SilvaProtect-CH – Processus avalanche – rapport final	22.02.2007	WSL-SLF	Chapitre 3
SilvaProtect-CH – Processus chute de pierres / chute de blocs, processus coulée de boue / glissement de terrain et processus lave torrentielle – rapport final	05.07.2006	GEOTEST AG – Geo7 AG – OEKO-B AG	Chapitres 4 à 6
SilvaProtect-CH – Processus épandage d'alluvions	13.05.2008	Geo7 AG	Chapitre 7

TABLE DES MATIÈRES

1	Processus considérés	5
2	Préparation du MNT10 servant de base à la modélisation	5
3	Avalanche.....	10
3.1	Bases de la modélisation du processus « avalanche ».....	10
3.2	Description de la modélisation.....	10
3.3	Calibrage des paramètres du modèle	16
3.4	Modélisation opérationnelle et qualité des résultats.....	22
4	Chute de pierres et de blocs	27
4.1	Bases de la modélisation pour le processus de chute	27
4.2	Description du processus	27
4.3	Description de la modélisation.....	28
4.4	Calibrage des paramètres du modèle	30
4.5	Modélisation opérationnelle et qualité des résultats.....	31
5	Coulée de boue / glissement de terrain	33
5.1	Bases de la modélisation du processus « coulée de boue »	33
5.2	Description du processus	35
5.3	Description de la modélisation de l'arrachement.....	36
5.4	Description de la modélisation du dépôt	44
5.5	Calibrage des paramètres du modèle	45
5.6	Modélisation opérationnelle et qualité des résultats.....	47
6	Lave torrentielle.....	49
6.1	Bases de la modélisation du processus « lave torrentielle »	49
6.2	Description du processus	49
6.3	Description de la modélisation de l'arrachement.....	49
6.4	Description de la modélisation de la portée et de la propagation sur le cône de déjection....	53
6.5	Calibrage des paramètres du modèle	55
6.6	Modélisation opérationnelle et qualité des résultats.....	56
7	Épandage d'alluvions	58
7.1	Vue d'ensemble des bases utilisées	58
7.2	Description du processus	59
7.3	Description de la modélisation de la rupture	60
7.4	Estimation du charriage potentiel	62
7.5	Critères d'occurrence d'un épandage d'alluvions.....	62
7.6	Paramètres appliqués pour simuler l'épandage d'alluvions	63
7.7	Justification du choix des paramètres	64
7.8	Qualité de la modélisation de l'épandage d'alluvions.....	65
8	Processus liés aux cours d'eau.....	67
8.1	Identification des processus déterminants	67

8.2	Identification des cours d'eau pertinents	67
8.3	Identification des périmètres de processus pertinents liés aux cours d'eau	69
9	Bibliographie.....	70
10	Annexe.....	73
10.1	Nouvelles classes de la Carte géotechnique de la Suisse.....	73

1 Processus considérés

Les processus de dangers suivants ont été considérés et modélisés:

Avalanche:	Zones de décrochement, de transit et de dépôt
Processus de chute:	Trajectoires des différentes chutes de pierres
Glissement de terrain / coulées de boue:	Zones d'arrachement et trajectoires de dépôt
Lave torrentielle:	Surfaces productrices de matériaux charriables, réseau de ravines et trajectoires de dépôt
Epanchage d'alluvions:	Points de départ et surfaces de débordement avec dépôt
Processus liés aux cours d'eau	Processus dans lesquels la forêt joue un rôle important en bordure de cours d'eau

2 Préparation du MNT10 servant de base à la modélisation

Dans le cadre du projet SilvaProtect-CH, M. Bernhard Schneider de l'Université de Bâle a été mandaté pour élaborer un modèle de terrain sous forme de grille couvrant toute la Suisse, de résolution égale à dix mètres, devant servir de base à la simulation des processus dans le module EVENT à partir des données vecteur et raster du modèle numérique de terrain MNT25. Ce modèle devait satisfaire les conditions suivantes:

- conserver les données originales: les points des grilles du MNT25 et du MNT10 ayant les mêmes coordonnées x et y devaient aussi avoir la même altitude;
- restituer la morphologie du terrain le plus précisément possible: aucun artefact ne devait être introduit dans le modèle; les dépressions créées artificiellement devaient, dans la mesure du possible, être réduites au minimum.

Le modèle numérique de terrain MNT25 de Swisstopo a servi de base et contient les éléments:

- modèle matriciel;
- données de base: courbes de niveau, contours des lacs, lignes de crête, cotes ponctuelles.

Les lignes de crête ne sont à disposition que pour les régions alpines de la Suisse.

Les calculs ont suivi les étapes suivantes:

1. Calcul du centre de toutes les cellules de la grille MNT25 à l'aide de surfaces de Bézier.
2. Triangulation entre les points disponibles (nœuds de la grille MNT25, cotes ponctuelles et points d'ancrage des courbes de niveau, des contours des lacs et des lignes de crête).
3. Calcul des perpendiculaires à la surface pour tous les points de la triangulation.
4. Construction de surfaces de Bézier cubiques à base triangulaire à partir de chaque sommet de triangle et des perpendiculaires à la surface passant par ces sommets. Calcul de l'altitude des nœuds de la nouvelle grille MNT10 à l'aide de ces surfaces de Bézier.
5. Elimination des dépressions artificielles.

Centre des cellules de la grille MNT25

Plusieurs méthodes mathématiques sont applicables pour construire la surface des cellules de la grille. Le terrain est généralement modélisé à l'aide de polynômes simples.

Ces approches ne permettent pas toujours de restituer les lignes de crête de manière satisfaisante. Considérons une arête orientée SW-NE, donc oblique par rapport à la grille. Elle doit être horizontale et passer exactement par un certain nombre de cellules de la grille. Dans ce cas, les cellules traversées devraient comprendre des surfaces ayant, au centre de chacune d'entre elles, la même altitude que les nœuds se trouvant à l'angle inférieur gauche et à l'angle supérieur droit (soit aux angles SW et NE) par lesquels l'arête passe. Lorsque ces surfaces sont modélisées à l'aide de polynômes simples, le centre des cellules se retrouve plus bas que ces angles et les surfaces semblent « suspendues » (figure 1). Il en résulte une arête crénelée.

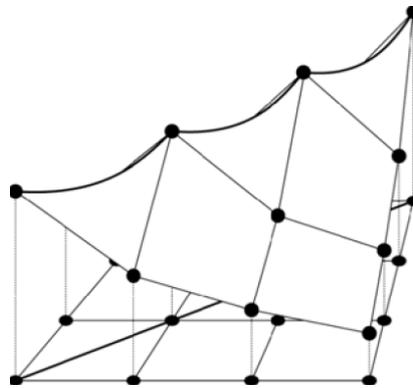


Figure 1: Effet d'« arête crénelée ».

Dans ce projet, cet effet a été évité autant que possible.

Des essais ont révélé que les meilleurs résultats sont obtenus lorsque la construction proprement dite des surfaces est précédée d'un calcul séparé du centre des cellules, ou plus précisément de leur altitude, qui est ensuite utilisée comme point d'ancrage pour construire les surfaces. Cette approche peut être considérée comme une tentative de transférer des informations sur le parcours de la surface du terrain au voisinage de la cellule traitée dans la cellule elle-même.

Le centre des cellules a été calculé à l'aide de surfaces de Bézier cubiques à base rectangulaire. La surface de toutes les cellules a été modélisée en appliquant une surface de Bézier. Leurs quatre angles coïncident alors avec les quatre angles de la cellule de la grille. Pour poser les derniers points d'ancrage servant à déterminer le parcours des surfaces de Bézier, on a calculé leur déclivité dans les directions x et y (donc S-N et W-E) à chaque angle de cellule. L'altitude du centre des cellules correspond alors à l'altitude des surfaces de Bézier résultantes à cet endroit.

Triangulation

Afin de construire ultérieurement des sous-surfaces, on a subdivisé la surface basale à partir des points disponibles en générant un maillage triangulaire (Triangulated Irregular Network, TIN) satisfaisant au critère de Delaunay.

Les points ayant fait l'objet de cette triangulation étaient les suivants:

- nœuds de la grille MNT25;
- centre des cellules de la grille MNT25;
- cotes ponctuelles du modèle de base MNT25;
- points d'ancrage des contours des lacs du modèle de base MNT25;
- points d'ancrage des lignes de crête du modèle de base MNT25.

En règle générale, de nombreux segments de droite interceptent des côtés de triangles. Pour modéliser correctement les changements de pente brusques le long des lignes de crête, on a soumis les intersections entre lignes de crête et côtés de triangles ainsi qu'entre contours de lacs et côtés de triangles à un traitement particulier: chaque point d'intersection a été introduit dans la triangulation comme un nouveau point, ce qui a généré de nouveaux triangles. L'altitude de ces points a été calculée linéairement à partir des segments de droite, ou plus exactement à partir des deux extrémités de ces segments.

Les points utilisés dans la triangulation – tous les points énumérés ci-dessus et ceux qui ont été ajoutés en considérant les intersections – sont qualifiés par la suite de « points donnés ».

Calcul des perpendiculaires aux surfaces

Pour construire les surfaces de Bézier à base triangulaire à l'étape suivante, il faut d'abord estimer la perpendiculaire à la surface à chaque point donné.

A cet effet, les facettes triangulaires ont été considérées comme des surfaces planes passant par les trois sommets des triangles. On a ainsi pu calculer la surface à chaque point comme correspondant à la moyenne des perpendiculaires aux facettes triangulaires planes adjacentes.

Les points donnés se trouvant sur des lignes de crête ou sur des contours de lacs ont été traités spécialement: on a considéré pour chacun d'entre eux non pas une seule perpendiculaire à la surface, mais une pour chaque triangle adjacent. La perpendiculaire à la surface de chaque triangle a été estimée – comme exposé précédemment – à partir de la facette triangulaire plane correspondante.

Calcul des altitudes au moyen de surfaces de Bézier cubiques

La surface du sol correspondant à chaque triangle a été modélisée au moyen d'une surface de Bézier cubique à base triangulaire (figure 2). Les trois sommets des triangles ainsi que les perpendiculaires à la surface qui leur sont associées déterminent l'emplacement et la forme des surfaces. Pour calculer l'altitude de chaque point recherché du MNT10, on a d'abord identifié le triangle dans lequel se trouve

chaque nœud de la grille, puis on a résolu l'équation de la surface de Bézier associée pour l'abscisse x et l'ordonnée y de chacun des nœuds.

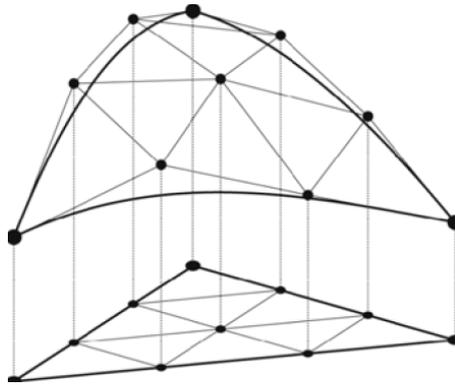


Figure 2: Surface de Bézier cubique à base triangulaire.

Les nœuds du MNT10 qui coïncidaient avec des nœuds du MNT25 en ont directement repris l'altitude. Dans ce cas, les calculs décrits précédemment n'avaient plus lieu d'être.

A l'issue des calculs d'altitude, on a vérifié chaque nœud du MNT10 pour voir s'il tombait dans un lac. Le cas échéant, on lui a conféré l'altitude des contours du lac.

Élimination des dépressions créées artificiellement

Une dépression située dans un certain secteur se compose d'un point bas (fond de la dépression), d'un secteur qui correspondrait au lac se formant sur un sol imperméable si la dépression était remplie d'eau et d'un point où l'eau imaginaire s'échapperait de la dépression (décharge). Ce point correspond à un col dans le terrain qui est à l'origine de deux lignes de pente: l'une d'entre elles retourne dans la dépression et s'achève au fond de celle-ci, l'autre s'en éloigne et s'achève soit dans une autre dépression, soit dans un plan l'eau (lac ou mer), soit à la périphérie de la zone considérée.

L'approche appliquée dans ce projet consiste à suivre la ligne de pente qui s'éloigne de la dépression jusqu'à ce qu'elle atteigne une cellule **B** située plus bas que le fond de la dépression ou s'achève comme décrit précédemment. Si cette ligne de pente atteint une cellule **B** d'altitude inférieure, elle est reliée à la ligne de pente retournant au fond de la dépression et elle est considérée comme un cheminement reliant la dépression à ses environs. L'altitude de toutes les cellules se trouvant le long de ce cheminement est alors modifiée de manière à obtenir une pente continue entre le fond de la dépression et l'extrémité du cheminement **B**. On construit ainsi un exutoire à partir de la cellule la plus profonde de la dépression, ce qui revient à éliminer cette dépression.

Les calculs inhérents à cette approche suivent les étapes suivantes:

1. La cellule **Z** qui n'a aucun exutoire (dont toutes les cellules voisines ont une altitude supérieure ou égale) est identifiée et déclarée dépression Δ .
2. Toutes les cellules voisines de la dépression Δ sont examinées et la plus basse d'entre elles, nommée **A**, est ensuite traitée comme suit:
 - si la cellule **A** n'est pas plus basse que toutes les cellules de la dépression Δ , elle est ajoutée à la dépression et le processus se poursuit selon l'étape 2;
 - si la cellule **A** est plus basse que la cellule la plus haute de la dépression Δ , la dépression est considérée comme circonscrite et le processus se poursuit selon l'étape 3. Si toutes les cellules de Δ traitées jusqu'ici ont la même altitude, il ne s'agit pas d'une dépression mais d'un secteur horizontal et le traitement de Δ est arrêté.
3. La cellule **A** marque désormais le début de l'écoulement à partir de la dépression Δ (c'est-à-dire le col qui relie la dépression à son voisinage). La ligne de pente s'éloignant de la dépression à partir de la cellule **A** est suivie jusqu'à ce qu'elle atteigne une cellule **B** qui satisfait à l'une des conditions suivantes:
 - la cellule **B** est plus basse que la cellule la plus basse de Δ . Le processus se poursuit selon l'étape 4;
 - la cellule **B** se trouve dans un lac. La dépression Δ est laissée telle quelle pour éviter de construire un écoulement en sortant qui traverserait le lac (ce qui modifierait les altitudes du lac). Son traitement est arrêté;
 - la cellule **B** se trouve à la périphérie du modèle de terrain. Le traitement de la dépression est arrêté;
 - la cellule **B** est entourée de cellules d'altitude supérieure. Elle se trouve donc dans une dépression Γ dont le fond est plus haut que le fond de la dépression Δ . Le processus revient à l'étape 2, sachant que la cellule **B** devient cellule **Z** et que les cellules de la dépression Δ et celles de la ligne de pente appartiennent déjà à la nouvelle dépression et ne sont donc pas considérées comme cellules voisines dans l'étape 2.
4. La ligne de pente correspondant à l'écoulement de la dépression Δ est rétroconstruite depuis la cellule **A** jusqu'au fond **Z** de cette dépression. Il en résulte une chaîne de cellules montant du fond **Z** de la dépression jusqu'à la cellule **A** le long de la ligne de pente venant d'être construite puis descendant le long de l'autre ligne de pente jusqu'à la cellule **B**. La cellule **B** se trouve dans tous les cas plus bas que la cellule **Z**. L'altitude de toutes les autres cellules de cette chaîne est alors recalculée linéairement en fonction de leur distance le long de la chaîne jusqu'aux cellules **A** et **Z**.

3 Avalanche

3.1 Bases de la modélisation du processus « avalanche »

Les bases suivantes ont été utilisées pour modéliser le processus « avalanche »:

- modèle numérique de terrain MNT10;
- aire forestière tirée du module SILVA;
- hauteur de neige régionale à l'altitude de 2000 m;
- isolignes des valeurs d'accroissement de la couche de neige en trois jours ($\Delta HS3$) pour une période de retour de 300 ans.

3.2 Description de la modélisation

Les calculs ont été effectués avec le modèle bidimensionnel AVAL-2D de Voellmy-Salm, directement issu du modèle numérique unidimensionnel AVAL-1D, décrit en détail dans Bartelt et al. (1999).

L'avalanche est considérée comme un écoulement non stationnaire sur un terrain quasi tridimensionnel, dont la vitesse est exprimée par un champ vectoriel bidimensionnel $\vec{u} = (u, v)$. Sa hauteur d'écoulement h , mesurée perpendiculairement à la ligne de pente, est la troisième et dernière inconnue. Le modèle AVAL-2D ne décrit que les avalanches coulantes, c'est-à-dire la partie relativement lourde qui s'écoule sur le sol. On admet que la neige formant les avalanches a une densité constante. Les équations différentielles fondamentales décrivant la conservation de la masse et du moment sont les suivantes:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{\nabla}(h\vec{u}) = 0 \quad (1)$$

et

$$\frac{\partial h\vec{u}}{\partial t} + \vec{\nabla}(h\vec{u} \otimes \vec{u}) = \vec{f} - \frac{1}{2} \vec{\nabla} \lambda h^2 \quad (2)$$

Le vecteur \vec{f} exprime la différence entre l'accélération gravitationnelle et les forces de frottement. Le paramètre λ exprime la pression d'écoulement active-passive résultant des contraintes longitudinales dans la masse de l'avalanche (Bartelt et al., 1999). Hormis cette pression λ , les équations différentielles correspondent dans leur principe aux équations applicables aux eaux peu profondes. En définissant un vecteur incluant les variables recherchées $\vec{U} = (h, h\vec{u})^T$, on peut regrouper comme suit les équations (1) et (2):

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{F}_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \vec{F}_2}{\partial x_2} = \vec{G} \quad (3)$$

où x_1 et x_2 décrivent le système de coordonnées bidimensionnel. Les vecteurs \vec{F}_1 et \vec{F}_2 valent

$$\vec{F}_1 = \begin{pmatrix} hu \\ hu^2 + \frac{1}{2}\lambda h^2 \\ huv \end{pmatrix} \quad (4)$$

et

$$\vec{F}_2 = \begin{pmatrix} hu \\ huv \\ hu^2 + \frac{1}{2}\lambda h^2 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Le vecteur $\vec{G} = (0, f_1, f_2)^T$ indique la différence entre les forces dues à l'attraction gravitationnelle et les forces de frottement agissant dans les deux directions de coordonnées. La résistance due au frottement f se compose d'un frottement sec selon la loi de Coulomb (qui dépend de la hauteur d'écoulement h) et d'un frottement turbulent proportionnel au carré de la vitesse:

$$f_1 = g_1 - fn_u \text{ et } f_2 = g_2 - fn_v, \text{ avec } f = \mu g_3 + \frac{g_3(u^2 + v^2)}{\xi h} \quad (6)$$

où g_1 , g_2 et g_3 sont les composantes de l'attraction gravitationnelle dans les trois directions de coordonnées. Les forces de frottement agissent principalement dans une couche de glissement située entre l'avalanche et le sol. Le modèle part de l'hypothèse que la masse de l'avalanche ne subit aucune déformation interne. Les paramètres de frottement μ et ξ décrivent les parts de résistance dues au frottement sec coulombien et au frottement turbulent lié à la vitesse. Ces deux résistances dépendent de la taille de l'avalanche.

Hormis le vecteur \vec{G} se trouvant à droite, ces équations utilisées dans le modèle sont similaires à celles d'Euler qui décrivent un gaz isotrope bidimensionnel. Cette formulation conservatrice est celle qui se prête le mieux pour discrétiser les équations différentielles, car elle permet d'appliquer des méthodes de discrétisation tenant compte de l'absorption des chocs. Pour résoudre le système, on a linéarisé la fonction en appliquant la règle de la dérivation en chaîne à l'équation 3 sous l'hypothèse $\vec{\nabla}\lambda = 0$,

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial t} + A \frac{\partial \vec{U}}{\partial x_1} + B \frac{\partial \vec{U}}{\partial x_2} = \vec{G} \quad (7)$$

avec

$$A = \frac{\partial \vec{F}_1}{\partial \vec{U}} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -u^2 + \lambda h & 2u & 0 \\ -uv & v & u \end{pmatrix} \quad (8)$$

et

$$B = \frac{\partial \vec{F}_2}{\partial \vec{U}} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -uv & v & u \\ -v^2 + \lambda h & 0 & 2v \end{pmatrix} \quad (9)$$

Ce système quasi linéaire (7) décrit une hyperbole en fonction du temps lorsque chaque combinaison linéaire réelle des matrices A et B prend une valeur propre réelle. En admettant que $\alpha^2 + \beta^2 = 1$, les matrices $\alpha A + \beta B$ se décomposent spectralement sous la forme des matrices $(\alpha A + \beta B) = S\Lambda S^{-1}$:

$$\Lambda = \text{diag}\left(\alpha u + \beta v, \alpha u + \beta v + \sqrt{\lambda h}, \alpha u + \beta v - \sqrt{\lambda h}\right) \quad (10)$$

$$S = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ -\beta\sqrt{\lambda h} & u + \alpha\sqrt{\lambda h} & u - \alpha\sqrt{\lambda h} \\ \alpha\sqrt{\lambda h} & v + \beta\sqrt{\lambda h} & v - \beta\sqrt{\lambda h} \end{pmatrix} \quad (11)$$

et

$$S^{-1} = \frac{1}{2\sqrt{\lambda h}} \begin{pmatrix} 2\beta u - 2\alpha v & -2\beta & 2\alpha \\ -\alpha u - \beta v + \sqrt{\lambda h} & \alpha & \beta \\ \alpha u + \beta v + \sqrt{\lambda h} & -\alpha & -\beta \end{pmatrix} \quad (12)$$

La matrice diagonale Λ fournit les valeurs propres réelles, qui indiquent la nature hyperbolique du système, tandis que les colonnes de S expriment les vecteurs propres (Sartoris & Bartelt, 2000).

Détermination des zones de décrochement potentielles et de la hauteur de la cassure

Les zones de décrochement potentielles dépendent étroitement du terrain, en particulier de sa déclivité. Différents seuils de déclivité – inférieurs et supérieurs – ont été examinés dans les sept secteurs-tests (voir le chapitre 3.3). On a d'abord appliqué des pentes de 30° à 55°. Puis on a porté les seuils à 28° et 60° sur suggestion des cantons de Berne (pour la limite inférieure) et des Grisons (pour la limite supérieure). Dans le secteur-test grison de Davos-Klosters, l'abaissement de la limite inférieure de 30° à 28° a augmenté considérablement la superficie des zones de décrochement potentielles en forêt, car de grandes étendues boisées garnissant des flancs de vallées proches de Davos tombent dans cet intervalle de pente. L'élargissement de la fourchette accroît notablement les zones de décrochement d'un seul tenant dans ces domaines intermédiaires. Au-dessous de 28-30°, le terrain est trop peu pentu pour qu'une grande avalanche s'y déclenche. Au-dessus de 55-60°, il est trop pentu pour que la neige s'y accumule, si bien que les pentes raides également ne sont guère sujettes à de grandes avalanches (McClung & Schaerer, 1993).

Gruber (2001) a développé une application SIG pour détecter automatiquement les zones de décrochement potentielles. Sa méthode consiste à analyser un modèle numérique de terrain et les peuplements forestiers. Maggioni et Gruber (2003) ont aussi étudié des zones de décrochement observées dans la région de Davos pour identifier leurs caractéristiques topographiques. Cette analyse statistique leur a permis d'établir une distribution de leur probabilité d'étendue en fonction de la période de retour et de la topographie. Il s'est avéré que les zones de décrochement d'avalanches extrêmes survenant en moyenne tous les 300 ans coïncident bien avec la délimitation selon Gruber (2001). Pour les avalanches plus fréquentes (p. ex. centennales), il faut généralement appliquer des zones de décrochement moins étendues. Mais comme ce sont les avalanches extrêmes qui sont prépondérantes dans les calculs effectués sous SilvaProtect-CH, les zones de décrochement ont été fixées ici en ap-

pliquant essentiellement la méthode de Gruber (2001). Le modèle a cependant été légèrement adapté pour tenir compte des expériences tirées dans les sept secteurs-tests. Les principales modifications ont consisté à:

- lisser les zones de décrochement:
 - constituer des surfaces de décrochement plus homogènes;
 - éviter la présence d'excroissances irréalistes dans les zones de décrochement;
 - subdiviser les zones en sous-zones lorsque ces dernières ne sont reliées que par de minces cordons;
- affiner les critères de délimitation des zones de décrochement en tenant compte des résultats obtenus dans les secteurs-tests. Dans la version de Gruber (2001), par exemple, la zone de décrochement de l'avalanche du Bisisthal (SZ) a été subdivisée en plusieurs petits secteurs bien qu'une grande avalanche s'y soit produite en 1999. Le code du modèle a subi quelques modifications basées sur cet exemple – qui se sont avérées très pertinentes dans d'autres régions.

Les tableaux 1 et 2 indiquent les paramètres de départ pour la délimitation automatique des zones de décrochement d'avalanches.

MNT	Modèle numérique de terrain
Forêt	Couverture forestière (0 = pas de forêt, 1= forêt dense, 2 = forêt clairsemée (considérée comme l'absence de forêt))
d0*	Epaisseur régionale du manteau neigeux à l'altitude de 2000 m (varie d'une région à l'autre, mais reste constante à l'intérieur de chaque sous-zone)
MinASize	Superficie minimale d'une zone de décrochement (= 5000 m ²)
MaxElimSize	Les zones stables entourées d'une zone de décrochement sont éliminées (incorporées dans la zone de décrochement) lorsque leur taille est inférieure à MaxElimSize.
MinALength	Longueur minimale des zones de décrochement (= 50 m)
MaxAltiDiff	Subdivision des zones de décrochement lorsque la dénivellation entre leur point le plus haut et leur point le plus bas est supérieure à 400 m.
S-Faktor	Facteur de lissage (= 0,35) appliqué pour arrondir les zones de décrochement et pour couper les minces cordons reliant deux zones de décrochement principales.
MinForestSize	Superficie boisée minimale (= 2500 m ²) qu'une zone de décrochement doit avoir pour être considérée comme une zone de décrochement en forêt.
AboveForestLength	Bande (largeur = 100 m) située directement à l'aplomb d'une surface boisée, considérée comme également stable car la forêt se trouvant juste en contrebas est intacte et qu'il n'y a donc manifestement aucun danger.

Tableau 1: Paramètres entrant dans l'application SIG qui délimite automatiquement les zones de décrochement d'avalanches.

Paramètre	Valeur
Intervalle de déclivité	28° à 60°
Superficie minimale des zones de décrochement	5000 m ²
Longueur minimale des zones de décrochement	50 m
Paramètre de séparation (nervure)	20 m

Tableau 2: Principales valeurs appliquées dans la délimitation automatique des zones de décrochement d'avalanches.

Il a fallu déterminer la hauteur des cassures en plus du contour des zones de décrochement. Suite aux observations faites lors des hivers 1951, 1954, 1968, 1974 et 1984, caractérisés par des avalanches extrêmes essentiellement dues à des chutes de neige persistantes de trois jours environ, le SLF a publié dans les années 1990 une directive indiquant comment calculer la hauteur de la cassure des avalanches extrêmes (Burkard & Salm, 1992; Salm et al., 1990). Cette directive se base sur des statistiques selon la loi de Gumbel portant sur la valeur annuelle de l'accroissement maximal de la couche de neige en trois jours (ΔHS_3). Seules les stations de mesure disposant d'informations sur plus de 40 ans ont été prises en considération pour que l'extrapolation à 300 ans fournisse des résultats pertinents. La figure 3 présente deux statistiques selon la loi de Gumbel, provenant des stations de mesure de l'Hospice du Simplon (altitude 2000 m), au sud-ouest de la Suisse, et de Santa Maria (altitude 1420 m), au sud-est du pays.

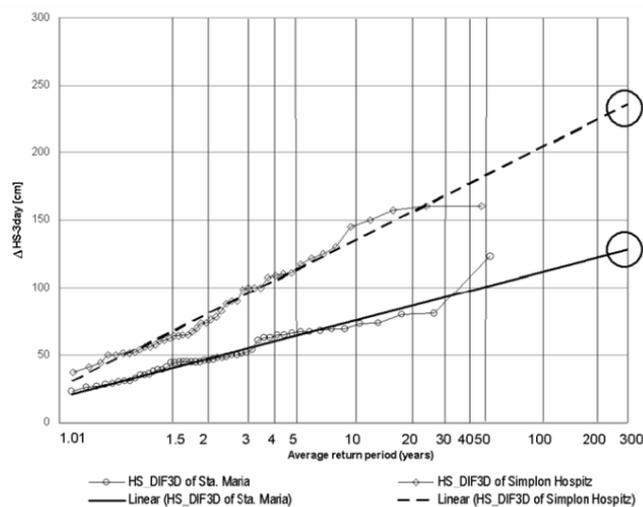


Figure 3: Séries de données et extrapolation statistique selon la loi de Gumbel des maxima annuels de la valeur ΔHS sur trois jours pour les stations de mesure de Santa Maria (altitude 1420 m, mesures sur 51 hivers) et de l'Hospice du Simplon (altitude 2000 m, mesures sur 46 hivers).

Le décalage considérable entre ces deux stations de mesure révèle à quel point il est important de disposer d'une méthode permettant de déterminer la hauteur de la cassure des avalanches extrêmes qui reflète au mieux la grande variabilité de ce paramètre tributaire de la région et de l'altitude. Comme le modèle numérique AVAL-2D considère la hauteur de la cassure perpendiculairement au terrain, elle doit encore être corrigée par le cosinus de la déclivité de la pente. La figure 4 présente les isolignes des valeurs ΔHS_3 pour une période de retour de 300 ans, interpolées à partir de toutes les stations de mesure disposant d'informations sur plus de 40 ans. Les valeurs illustrées s'appliquent à une altitude de 2000 m et une déclivité de 28°. L'application SIG détermine, pour chaque région, la hauteur de la cassure dans chaque zone de décrochement potentielle en corrigeant la valeur par défaut d'après la déclivité et l'altitude (+/- 5 cm par +/- 100 m de dénivellation) de chaque zone de décrochement (Salm et al., 1990; Burkard & Salm, 1992).

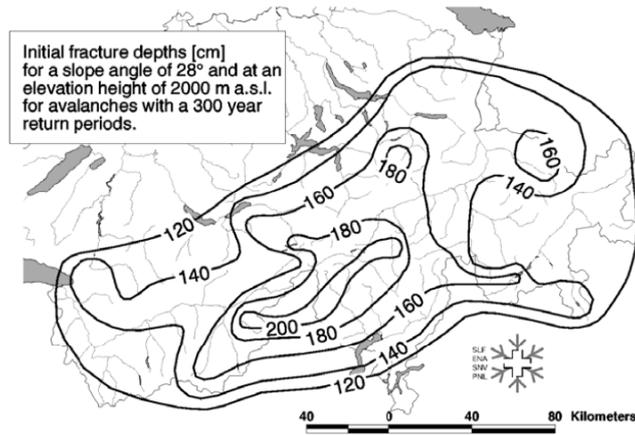


Figure 4: Isolignes des valeurs $\Delta HS3$ pour une période de retour de 300 ans dans les Alpes suisses.

Le dernier paramètre essentiel intervenant dans le décrochement qui doit être déterminé pour appliquer le modèle AVAL-2D dans l'ensemble des Alpes suisses est l'altitude minimale à laquelle de grosses avalanches peuvent se produire dans les diverses régions. Les seuils déjà posés par Brassel & Lischke (2001) ont bien fonctionné dans les sept secteurs-tests. Les responsables du canton de Schwytz auraient souhaité que la limite soit placée à moins de 900 m. Mais comme les cantons environnants appliquent déjà cette altitude, il a été décidé de s'y tenir. Les seuils utilisés sont indiqués au tableau 3. Les limites entre les domaines nord-alpin, intra-alpin et sud-alpin sont exposées à la figure 6. Le tableau 7 présente aussi les hauteurs de cassure $d_{0(300)}^*$ effectivement appliquées dans les trente secteurs opérationnels modélisés de Suisse.

Région	Altitude minimale de la zone de décrochement
Secteur nord-alpin	900 m
Secteur intra-alpin	1100 m
Secteur sud-alpin	1200 m

Tableau 3: Altitude minimale à laquelle de grandes avalanches peuvent se produire dans les trois régions distinguées (figure 4).

La figure 5 expose schématiquement les principales étapes des calculs.

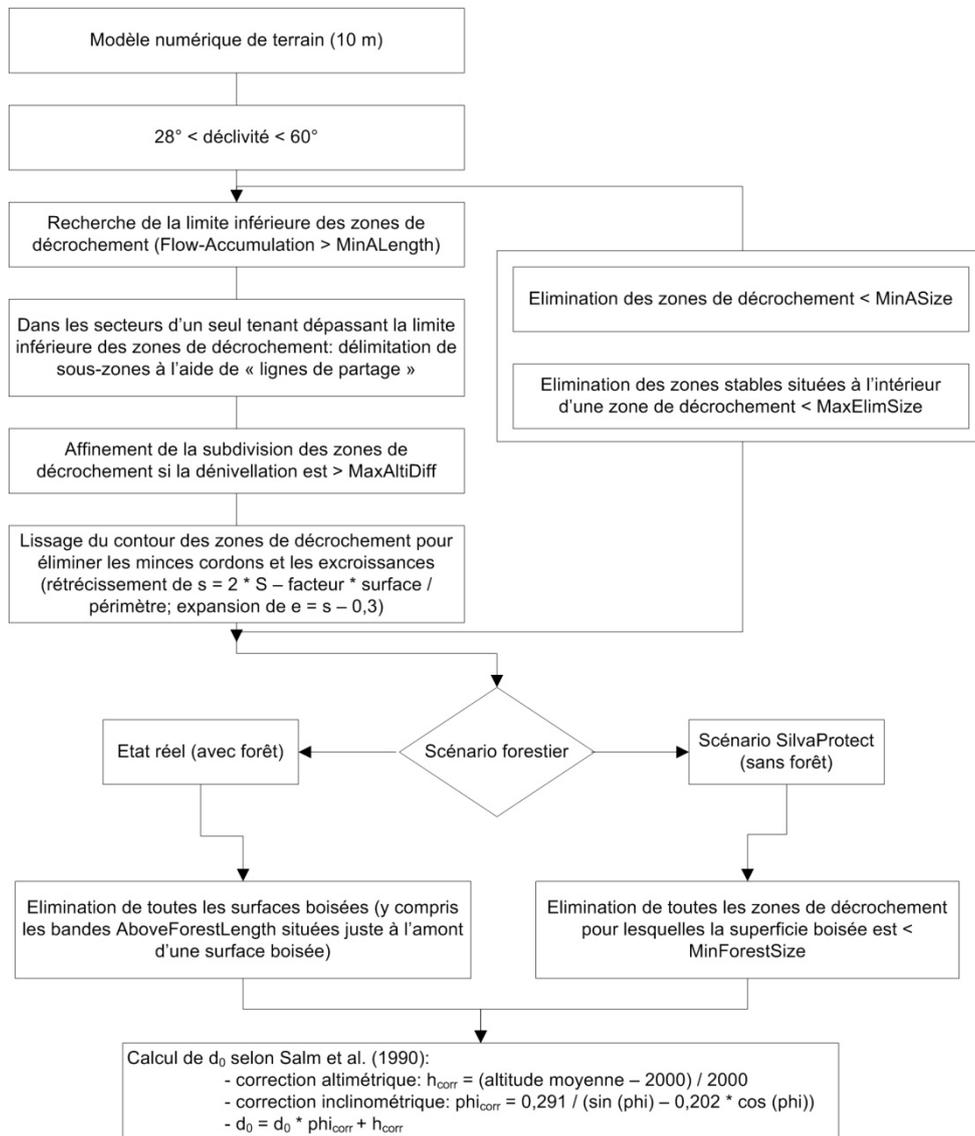


Figure 5: Organigramme des principales étapes des calculs.

3.3 Calibrage des paramètres du modèle

Les paramètres décrivant le frottement sec (μ) et le frottement turbulent (ξ) dans AVAL-2D varient en fonction de la taille de l'avalanche, de son altitude et de la canalisation lié à la topographie (Gruber, 1998). Mais le modèle bidimensionnel n'avait encore jamais été calibré systématiquement dans toutes les Alpes suisses. On a donc sélectionné sept secteurs-tests représentant aussi bien que possible les différentes régions nivologiques et altimétriques du pays et bénéficiant de bonnes informations sur la propagation des avalanches (figure 6). Puis on a modélisé au mieux le danger d'avalanche régnant dans l'ensemble de ces secteurs.

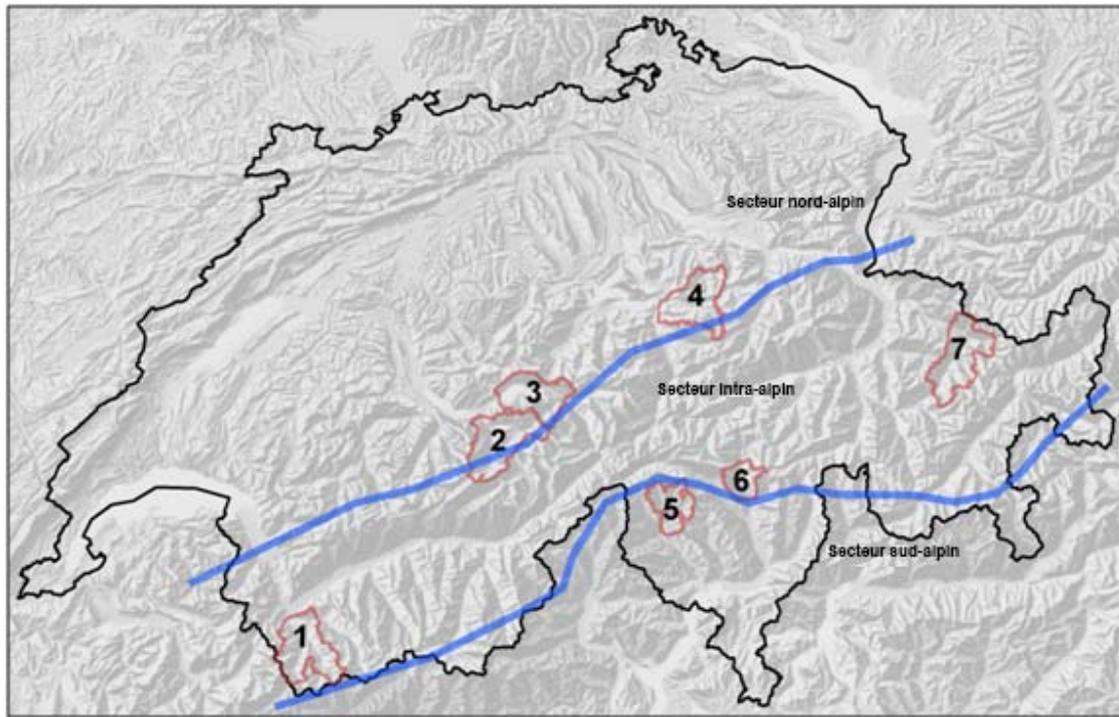


Figure 6: Situation des sept secteurs-tests utilisés pour calibrer les paramètres de frottement μ et ξ d'AVAL-2D. Le tableau 4 synthétise les caractéristiques principales de chacun d'entre eux (superficie, altitude, qualité des données sur les avalanches).

La qualité des données sur les avalanches disponibles pour faire des comparaisons avec les résultats des simulations varie d'un secteur-test à l'autre (tableau 4). Les secteurs n° 1 (Val Ferret), n° 2 (Wengen), n° 3 (Brienz) et n° 7 (Davos) bénéficient aussi bien de longues séries d'observations historiques que de cartes des dangers d'avalanche – du moins dans les zones habitées. Ces deux types d'informations existent sous forme numérique.

Dans la région n° 4 (Schwytz), le cadastre des avalanches n'est pas encore entièrement numérisé, tandis que les régions n° 5 (Val Maggia) et n° 6 (Val Blenio) ne disposent pas encore de cadastre numérique des avalanches, mais seulement d'informations reportées sur des plans.

N°	Nom	Région	Superficie [km ²]	Altitude des zones de dépôt [m]	Qualité des données disponibles sur les avalanches	Evaluation qualitative des résultats des simulations
1	Val Ferret	Secteur intra-alpin	307	800-1600	Bonnes (numériques)	Satisfaisants à bons
2	Wengen	Secteur nord-alpin	330	650-1300	Bonnes (numériques)	Satisfaisants à bons
3	Brienz	Secteur nord-alpin	261	550-1200	Bonnes (numériques)	Satisfaisants à bons
4	Schwytz	Secteur nord-alpin	280	400-1000	Moyennes (partiellement numériques)	Satisfaisants
5	Val Blenio	Secteur intra-alpin	110	700-1600	Moyennes (analogiques)	Bons
6	Val Maggia	Secteur sud-alpin	161	500-1300	Moyennes (analogiques)	Bons
7	Davos	Secteur intra-alpin	307	1200-1600	Très bonnes (numériques)	Bons

Tableau 4: Caractéristiques des sept secteurs-tests (figure 6) utilisés pour calibrer les paramètres de frottement. Le tableau comprend également une évaluation qualitative émanant des spécialistes cantonaux.

Les résultats obtenus dans tous les secteurs ont été évalués qualitativement par les spécialistes cantonaux. Ils ont comparé visuellement des plans consignant les conclusions des simulations avec les données disponibles sur les avalanches, puis ils ont jugé si les résultats étaient « bons », « satisfaisants » ou « insatisfaisants » en prélude à la simulation du scénario « sans forêt » sur l'ensemble de la Suisse. Leur évaluation figure dans le tableau 4. Aucun résultat n'a été jugé insatisfaisant.

En plus de cette appréciation qualitative, les résultats des simulations ont été évalués quantitativement dans les secteurs-tests bénéficiant d'informations numériques sur les avalanches. La comparaison a été compliquée par le fait que les événements historiques sont peu documentés dans les endroits reculés, où personne ne les a vues. Or les calculs se fondent sur les mêmes critères dans les zones densément peuplées – faisant l'objet d'un cadastre des avalanches exhaustif – que dans les endroits isolés. La comparaison quantitative a donc été limitée aux périmètres distants de moins de 500 m d'objets susceptibles d'être endommagés tels que localités, routes ou voies ferrées. A l'intérieur de ces périmètres, les surfaces résultant des simulations ont été comparées avec les zones de dépôt figurant dans le cadastre et dans les cartes des dangers. La figure 7 présente un exemple de cette comparaison.

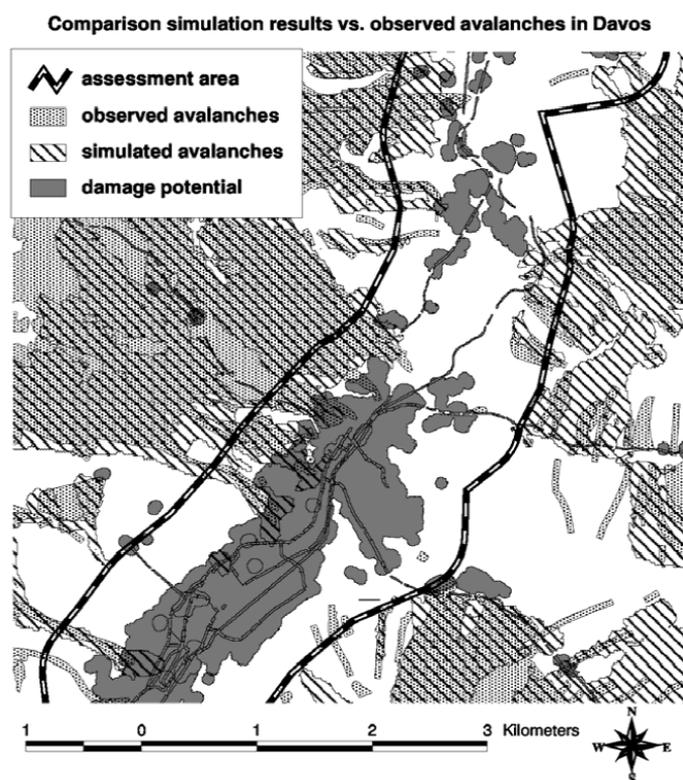


Figure 7: Extrait de la comparaison entre les résultats des simulations et les périmètres inscrits au cadastre des avalanches dans la région de Davos.

Le tableau 5 regroupe les résultats de la comparaison quantitative réalisée dans les quatre secteurs-tests bénéficiant de données numériques sur les avalanches. La surface totale couverte par le cadastre et/ou par les cartes des dangers donne des renseignements sur la menace de l'avalanche présent

sur chaque secteur. Par exemple, le Val Ferret est une vallée d'altitude relativement élevée bordée de versants raides. C'est pourquoi environ 20 % du fond du val sont menacés par des avalanches. Le secteur-test de Brienz se trouve en revanche à basse altitude, dans le secteur nord-alpin ; c'est pourquoi seuls 5 % des fonds de vallée sont sujets aux avalanches. Les simulations doivent être à même de restituer correctement ces variations du danger d'avalanche d'une région à l'autre. C'est effectivement le cas dans les quatre régions-tests, où l'écart entre le pourtour des avalanches observées historiquement et le pourtour des zones de dépôt simulées est toujours resté inférieur à 10 %. Ce résultat quantitatif confirme l'évaluation qualitative des experts cantonaux.

Il est important de relever que la surface totale résultant des simulations est systématiquement supérieure à celle des avalanches observées historiquement et à celle qui figure dans les cartes des dangers. Il y a deux explications principales à cela:

1. Les simulations ont pour but de calculer l'extension des avalanches tricentennales, comme prescrit dans les directives sur l'établissement des cartes des dangers. Les cadastres ne recensent par contre que les événements des 150 dernières années. Il est donc normal que la surface calculée soit supérieure à la surface observée.
2. De nombreux ouvrages paravalanches ont été érigés en Suisse au cours des 50 dernières années. Ils influencent l'extension des avalanches ou empêchent même leur déclenchement. Il aurait en principe été possible d'inclure l'incidence de ces protections dans les simulations numériques réalisées dans le cadre de SilvaProtect-CH. Mais cela n'a pas été fait, car les caractéristiques des ouvrages bâtis, n'existant pas sous forme numérique, n'auraient pas pu être intégrées dans les calculs à l'échelle de la Suisse moyennant un prix raisonnable. Aussi a-t-on décidé de réaliser les simulations comme s'il n'y avait aucun paravalanche. Il est donc normal que la distance de dépôt calculée tende à être exagérée.

Le tableau 5 indique que les simulations numériques dépassent les résultats corrects d'environ 90-170 %, ce qui signifie qu'elles considèrent comme menacés des périmètres dans lesquels on n'a encore jamais observé d'avalanche ni délimité de zone de danger. Par ailleurs, une superficie correspondant à 50-67 % des périmètres correctement identifiés n'est pas considérée comme menacée bien qu'on y ait déjà observé une avalanche ou tracé une zone de danger. Cette dernière erreur aurait été excessive si le projet SilvaProtect-CH avait eu pour but d'établir une carte indicative des dangers, car ce type de document doit localiser tous les périmètres potentiellement menacés. On pourrait en principe atténuer la deuxième erreur tout en conservant le même type de modélisation, mais on accroîtrait alors la première inexactitude – la surestimation des périmètres effectivement menacés. Or cela n'est pas dans l'intérêt du projet, car le but des calculs réalisés dans le cadre de SilvaProtect consiste à déterminer un danger d'avalanche « moyen » sur toutes les régions de Suisse. C'est pourquoi la sous-estimation du danger d'avalanches dans certains secteurs ne porte pas trop à conséquence.

	N° 1: Val Ferret		N° 2: Wengen		N° 3: Brienz		N° 7: Davos	
	km ²	% de la superficie						
Surface totale soumise à la comparaison	48,6	100	49,8	100	32,5	100	36,1	100
Surface totale menacée selon les simulations	12,6	26	8,5	17	2,3	7	6,5	18
Surface totale menacée selon les cadastres et les cartes	10	21	4,8	10	1,5	5	5	14
Différence entre les simulations et les cadastres et les cartes	2,6	5	3,7	7	0,8	2	1,5	4
	km²	% correct						
Périmètres désignés correctement par les simulations	6,6	100	3,2	100	0,9	100	3,1	100
Périmètres menacés selon les simulations mais ne figurant ni dans un cadastre ni dans une carte des dangers	6	91	5,3	166	1,4	156	3,4	110
Périmètres non menacés selon les simulations mais figurant dans un cadastre ou dans une carte des dangers	3,4	52	1,6	50	0,6	67	1,9	61

Tableau 5: Résultats de la comparaison quantitative entre les résultats des simulations et les données numériques figurant dans les cadastres des avalanches et les cartes des dangers couvrant les quatre secteurs-tests « Val Ferret », « Wengen », « Brienz » et « Davos ».

Les coefficients de frottement μ et ξ appliqués pour obtenir ces résultats sont synthétisés dans le tableau 6. Le volume au départ a été subdivisé en trois catégories pour tenir compte de leur dépendance vis-à-vis de la taille des avalanches. Trois classes d'altitude ont aussi été distinguées pour considérer l'accroissement de l'humidité de la neige avec la baisse de l'altitude. La topographie des couloirs d'avalanche a été fractionnée en quatre catégories en fonction de la courbure du terrain (distinction entre les configurations convexes et concaves) et de la déclivité de la pente. La courbure du terrain parallèle aux courbes de niveau (planar curvature ou courbure dans le plan K) a été calculée en appliquant la fonction « courbure » d'ArcInfo GRID (ESRI, 2002) après avoir interpolé le modèle de terrain original d'une maille de 25 m pour passer à une maille de 10 m. Puis la topographie a été subdivisée selon les classes « ravine » ($K < -3$), « terrain canalisé » ($-3 < K < -1.5$) et « terrain ouvert » ($K > -1.5$). Lorsque la zone de dépôt est plate, le modèle bidimensionnel n'est pas à même de simuler les bras formés dans les avalanches réelles, mais il répartit régulièrement la neige sur tout le terrain ouvert. L'avantage est que la zone de danger potentielle est correctement appréhendée dans toute sa largeur. Mais cet étalement ralentit l'avalanche et raccourcit donc sa portée potentielle. Pour atteindre malgré tout la distance de dépôt des avalanches observées dans le passé, il faut réduire les coefficients de frottement en terrain plat. Est considéré comme plat un terrain dont la déclivité est inférieure à 5° (Gruber, 2001).

		Volume de départ					
		< 25 000 m ³		25 000 – 60 000 m ³		> 60 000 m ³	
		μ	ξ [ms ⁻²]	μ	ξ [ms ⁻²]	μ	ξ [ms ⁻²]
1500 m >	Terrain ouvert	0,23	2000	0,19	2000	0,145	3500
	Terrain canalisé	0,28	1500	0,26	1500	0,23	2000
	Ravine	0,36	1200	0,31	1200	0,26	1200
	Terrain plat (< 5°)	0,21	2500	0,18	2500	0,135	4000
	Terrain boisé	$\Delta 0,02^1$	400	$\Delta 0,02^1$	400	$\Delta 0,02^1$	400
1000-1500 m	Terrain ouvert	0,24	1500	0,2	1500	0,16	3000
	Terrain canalisé	0,29	1200	0,27	1200	0,24	1500
	Ravine	0,37	1000	0,32	1000	0,27	1200
	Terrain plat (< 5°)	0,22	2250	0,18	2500	0,145	3500
	Terrain boisé	$\Delta 0,02^1$	400	$\Delta 0,02^1$	400	$\Delta 0,02^1$	400
1000 m <	Terrain ouvert	0,25	1500	0,21	1500	0,175	2500
	Terrain canalisé	0,3	1200	0,28	1200	0,25	1500
	Ravine	0,38	1000	0,35	1000	0,28	1200
	Terrain plat (< 5°)	0,23	2000	0,19	2500	0,16	3000
	Terrain boisé	$\Delta 0,02^1$	400	$\Delta 0,02^1$	400	$\Delta 0,02^1$	400

Tableau 6: Coefficients de frottement μ et ξ appliqués dans le modèle AVAL-2D, en fonction du volume de départ, de l'altitude, de la morphologie du terrain et de la couverture forestière, pour la cartographie indicative des dangers à grande échelle dans le cadre du projet SilvaProtect-CH, module « Avalanche ».

Comme évoqué précédemment, les forêts denses préviennent le déclenchement des avalanches. Or de grosses avalanches partant à l'amont de la limite des arbres sont parfaitement capables de détruire même une forêt dense. C'est pourquoi la forêt offre une protection fiable seulement si aucune zone de décrochement n'est située en dessus d'elle. On ne sait pas encore exactement à quel point la forêt ralentit les avalanches, mais on admet que son incidence varie considérablement selon que les arbres soient cassés ou déracinés. Elle dépend aussi fortement de la quantité de neige en mouvement dans le périmètre boisé. On a majoré les coefficients de frottement en zone boisée lors de la simulation de « l'état réel » afin de considérer sommairement ce ralentissement supplémentaire. Pour décrire le frottement turbulent ξ , on a appliqué une valeur de 400 ms⁻² et pour décrire le frottement sec μ , on a majoré la valeur inhérente à l'état non boisé de 0,02. Cette estimation de l'effet ralentisseur de la forêt est très grossière.

¹ Contrairement à tous les autres paramètres, la valeur de μ n'est pas absolue à l'intérieur des surfaces boisées. Elle est égale à la valeur inhérente à la catégorie correspondante en terrain non boisé majorée de 0,02.

3.4 Modélisation opérationnelle et qualité des résultats

Le but du projet SilvaProtect-CH est de superposer le champ d'action des avalanches aux dommages potentiels. Si l'une d'entre elles atteint un objet susceptible d'être endommagé, il est important de localiser sa zone de décrochement. Si elle se trouve en forêt, celle-ci joue potentiellement un rôle protecteur. Il faut donc s'assurer que les résultats soient consignés de manière à ce que chaque zone de dépôt puisse être corrélée avec une zone de décrochement. Cela n'est possible que si les zones de décrochement voisines sont traitées l'une après l'autre dans la simulation. Sinon, les zones de décrochement et de dépôt ne peuvent pas être reliées sans ambiguïté. Pour y parvenir, on a suivi les étapes suivantes, implémentées au moyen de scripts AML (ArcInfo Macro Language) (ESRI, 2002):

1. Sélection automatique des zones de décrochement potentielles à l'intérieur des périmètres densément boisés existants. Calcul de la hauteur de la cassure sur la base de l'analyse de statistiques portant sur les valeurs extrêmes mesurées dans des stations en service depuis une longue période (figure 4), en appliquant les règles décrites dans Salm et al. (1990) pour tenir compte de l'altitude et de la déclivité de la zone de décrochement locale.
2. Subdivision de toutes les zones de décrochement potentielles en fonction du volume au départ, selon les classes « petite » ($< 25\,000\text{ m}^3$), « moyenne » et « grande » ($> 60\,000\text{ m}^3$) avalanche. Détermination des coefficients de frottement μ et ξ pour ces 3 classes de taille.
3. Subdivision plus fine des zones de décrochement voisines appartenant à la même classe de taille en neuf sous-zones, qui seront traitées dans neuf simulations. C'est ainsi que la situation « zones de décrochement dans une forêt existante » a fait l'objet de 27 simulations en tout (3 classes de taille pour 9 aires de décrochement distinctes).
4. Réalisation des calculs inhérents à ces simulations, puis vérification de l'absence de chevauchement. Les zones de décrochement qui se superposeraient encore sont fractionnées à nouveau pour faire l'objet de 9 sous-calculs au maximum. Cette subdivision en 9 nouvelles simulations s'est avérée insuffisante dans certains cas, notamment dans les vallées encaissées sujettes à la décharge de nombreuses zones de décrochement. Le fractionnement n'a pas été poussé plus loin dans ces cas particuliers. Il est donc possible qu'une zone de dépôt soit reliée à plus d'une zone de décrochement. Mais cela ne devrait guère influencer le résultat global de SilvaProtect-CH, car les périmètres si menacés ne comprennent en principe aucun objet susceptible d'être endommagé.
5. Réalisation des calculs inhérents à ces simulations supplémentaires après avoir subdivisé une deuxième fois les zones de décrochement.

Selon cette méthode, il faut réaliser au maximum 243 simulations numériques par périmètre traité dans la situation « zones de décrochement dans une forêt existante ». Environ 120 simulations ont généralement été nécessaires pour atteindre le but fixé consistant à distinguer clairement les couloirs d'avalanches.

Bien que le but principal du projet ait été de délimiter les forêts protectrices, il a été décidé d'appliquer aussi le modèle à l'« état réel ». Cette option a conduit à plus que doubler le nombre de simulations, car les zones de décrochement sont plus nombreuses à l'extérieur qu'à l'intérieur des forêts. Cela

requiert une subdivision plus fine, avec pour conséquence une augmentation du nombre de simulations. Le scénario « état réel » a demandé en moyenne 150 simulations pour distinguer clairement les couloirs d'avalanches.

La résolution spatiale de calculs est de 25 m, ce qui correspond à celle du modèle numérique de terrain utilisé. Les Alpes suisses ont été subdivisées en 30 secteurs délimités en fonction de caractéristiques topographiques telles que lignes de crête ou fonds de vallée (figure 8 et tableau 7). Le plus grand d'entre eux avait une superficie d'environ 1 500 km² – limite découlant de la mémoire vive (RAM) de 1,5 GB disponible dans l'ordinateur Linux utilisé. Tous les calculs sous SIG ont été réalisés avec une station de travail Sun Solaris à quatre processeurs. Les simulations numériques (programmées en langage C) ont été exécutées sur un grid Linux de vingt ordinateurs, équipés chacun d'un processeur à 2,8 GHz et de 1,5 GB de RAM. Les calculs sous SIG ont duré une trentaine de minutes par simulation et la simulation proprement dite entre 1h et 72h, selon la configuration du terrain et le nombre de zones de décrochement potentielles. L'ensemble des calculs a demandé une bonne année, pendant laquelle les processeurs des vingt ordinateurs Linux ont été utilisés à 50-60 % en moyenne. Quelque 10 000 simulations ont été réalisées en tout.

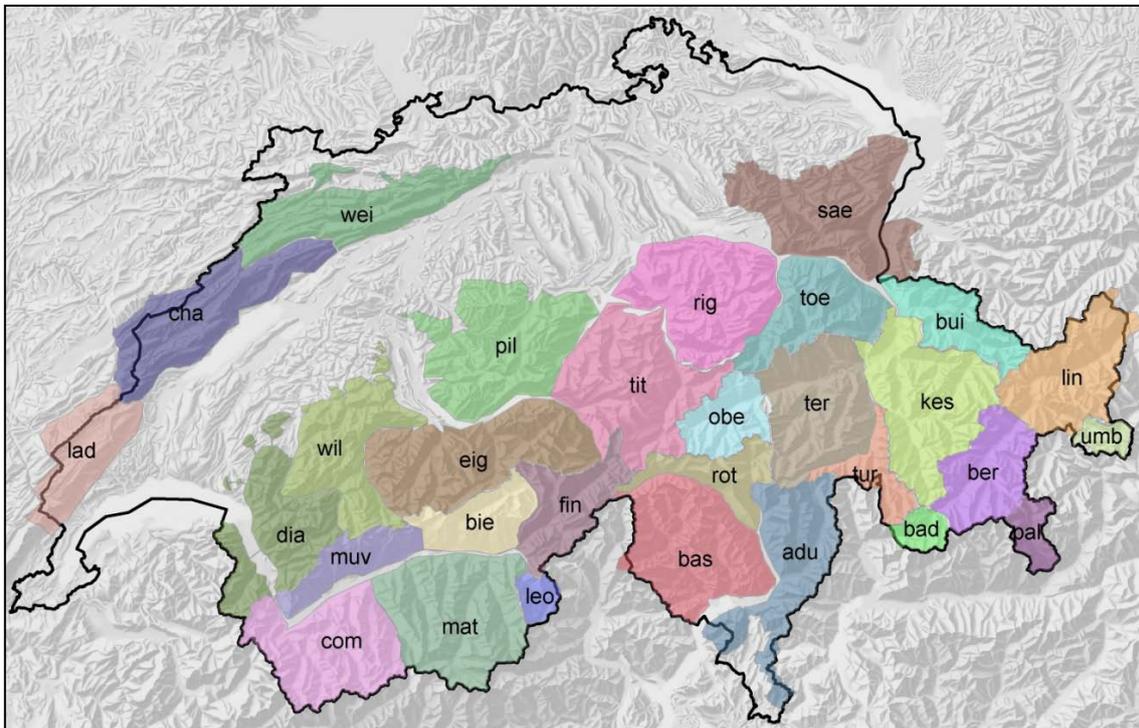


Figure 8: Vue d'ensemble des 30 secteurs opérationnels modélisés dans le cadre du projet SilvaProtect-CH, module « Avalanche ».

Abréviation	Nom	Superficie [m ²]	Superficie [km ²]	d ₀ [*] ₍₃₀₀₎	Région
adu	Piz Adula	1 117 843 953	1118	1,8	Secteur sud-alpin
bad	Piz Badile	178 821 784	179	1,8	Secteur sud-alpin
bas	Basodino	1 410 971 486	1411	2,0	Secteur sud-alpin
ber	Piz Bernina	765 330 992	765	1,2	Secteur intra-alpin
bie	Bietschhorn	585 448 758	585	1,5	Secteur intra-alpin
bui	Piz Buin	641 245 296	641	1,6	Secteur nord-alpin
cha	Chasseral	1 294 997 209	1295	1,2	Secteur nord-alpin
com	Grand Combin	1 254 180 991	1254	1,3	Secteur intra-alpin
dia	Les Diablerets	1 099 877 442	1100	1,5	Secteur nord-alpin
eig	Eiger	1 574 854 897	1575	1,4	Secteur nord-alpin
fin	Finsteraarhorn	709 137 366	709	1,6	Secteur intra-alpin
kes	Piz Kesch	1 460 553 394	1461	1,4	Secteur intra-alpin
lad	La Dôle	789 665 205	790	1,2	Secteur nord-alpin
leo	Monte Leone	161 264 769	161	2,1	Secteur sud-alpin
lin	Piz Linard	1 081 209 596	1081	1,3	Secteur intra-alpin
mat	Matterhorn	1 511 895 912	1512	1,6	Secteur intra-alpin
muv	Muveran	488 576 280	489	1,3	Secteur intra-alpin
obe	Oberalpstock	511 937 046	512	1,8	Secteur intra-alpin
pal	Piz Palü	229 355 260	229	1,4	Secteur sud-alpin
pil	Pilatus	1 588 914 289	1589	1,6	Secteur nord-alpin
rig	Rigi	1 407 363 905	1407	1,6	Secteur nord-alpin
rot	Pizzo Rotondo	492 019 082	492	2,1	Secteur sud-alpin
sae	Sântis	1 568 300 126	1568	1,6	Secteur nord-alpin
ter	Piz Terri	1 220 712 299	1221	1,6	Secteur intra-alpin
tit	Titlis	1 548 358 003	1548	1,6	Secteur nord-alpin
toe	Tödi	888 196 751	888	1,7	Secteur nord-alpin
tur	Piz Turba	339 850 116	340	1,6	Secteur intra-alpin
umb	Pizzo Umbreil	149 731 428	150	1,2	Secteur intra-alpin
wei	Weissenstein (JU)	1 113 044 014	1113	1,2	Secteur nord-alpin
will	Wilerhorn	1 118 971 569	1119	1,4	Secteur nord-alpin
Superficie totale: 28 303					

Tableau 7: Vue d'ensemble des 30 secteurs opérationnels modélisés.
(d₀^{*}(300) = épaisseur régionale du manteau neigeux à l'altitude de 2000 m)

Qualité des résultats

Cette modélisation largement automatisée a porté sur une superficie supérieure à 25 000 km². Aucune erreur systématique n'a été constatée entre les différentes régions des sept secteurs-tests. La méthode appliquée présente l'avantage de traiter tous les secteurs de la même manière, ce qui confère une certaine réalité aux résultats. Elle est donc bien adaptée pour atteindre le but prioritaire du projet SilvaProtect-CH, qui consiste à élaborer une base aussi objective que possible pour délimiter les périmètres boisés assurant une fonction protectrice.

Il faut cependant noter qu'une démarche aussi automatisée comprend inévitablement un risque d'erreur considérable dans les cas particuliers. Les résultats obtenus ne permettent absolument pas

d'établir définitivement le danger d'avalanche régnant dans un versant donné. Cette manière de modéliser les avalanches souffre des principales faiblesses suivantes:

- Les paramètres entrant dans la modélisation des avalanches comportent une grande incertitude. C'est ainsi, par exemple, que la délimitation des zones de décrochement (Maggioni & Gruber, 2003) et la détermination de la hauteur des cassures (Gruber & Margreth, 2001) peuvent être entachées d'erreurs considérables. La variabilité des coefficients de frottement (Barbolini et al., 2000) génère aussi d'importantes incertitudes. On essaie d'atténuer ces inexacitudes en pratiquant des simulations de type Monte-Carlo. Mais cette approche ne convient pas à la modélisation des avalanches dans une région de 25 000 km², car le calcul d'un seul scénario demanderait déjà six mois. La démarche appliquée ici ne peut donc pas considérer explicitement ces incertitudes. Le modèle a été calibré dans les sept secteurs-tests de manière à refléter au mieux le danger potentiel moyen dans un vaste périmètre. Mais si on s'intéresse à une pente spécifique, on risque de surestimer ou de sous-estimer largement le danger effectif. Il faut impérativement en tenir compte lorsqu'on utilise les résultats de ces simulations dans un versant particulier.
- Sur le terrain, plusieurs avalanches peuvent partir simultanément dans des secteurs contigus (Gruber & Margreth, 2001). L'augmentation de la masse de neige qui en résulte prolonge la distance de dépôt par rapport au cas d'avalanches isolées. Dans le cadre de SilvaProtect-CH, les zones de décrochement voisines ont été séparées systématiquement afin de pouvoir localiser celle qui correspond à chaque zone de dépôt. C'est pourquoi la portée des avalanches tend à être sous-estimée lorsque plusieurs décrochements se produisent simultanément côte à côte, même si les coefficients de frottement ont été diminués légèrement pour intégrer – en moyenne – ces départs à grande échelle. Il faut impérativement en tenir compte lorsque l'on considère un versant particulier.
- Signalons aussi que le modèle numérique mis en œuvre ne reflète que très sommairement le phénomène complexe de l'avalanche. L'effet de l'avalanche poudreuse est par exemple entièrement ignoré. De plus, le modèle ne considère que le volume au départ, mais pas la neige ajoutée ou soustraite sur la trajectoire (Sovilla & Bartelt, 2002). Des travaux visant à intégrer cet apport de neige dans le modèle sont actuellement en cours (Sovilla et al., 2005). Mais il faudra attendre encore un peu avant que le modèle décrivant ce processus ne soit également calibré.

L'expert en avalanches jouera toujours un rôle crucial lorsqu'il s'agira d'évaluer un versant donné pour cartographier les dangers y régnant. Seul un expert connaissant bien le terrain et le manteau neigeux est capable d'élaborer des scénarios judicieux à modéliser et de vérifier la pertinence des résultats obtenus. Mais la modélisation des dangers à grande échelle réalisée dans le cadre de SilvaProtect-CH peut être utile à l'expert local pour opérer une première approche totalement indépendante des aspects personnels et politiques susceptibles de l'influencer. La méthode de calcul bien définie mise en œuvre dans SilvaProtect-CH peut lui donner un bon point de départ pour se forger ses propres scénarios afin d'analyser les dangers en détail d'une manière aussi objective que possible.

La modélisation de l'« état réel » peut être utile dans les buts suivants:

1. Elle sert de référence pour évaluer la précision des résultats obtenus dans la modélisation strictement liée à SilvaProtect-CH. Lorsque les résultats des calculs portant sur l'« état réel » coïncident suffisamment bien avec les cadastres et les cartes des dangers d'avalanche, on peut penser que la délimitation de la forêt protectrice est aussi satisfaisante.
2. Les résultats obtenus fournissent aux experts cantonaux en avalanches une première estimation du danger potentiel facilitant l'identification des secteurs critiques, dans lesquels le danger d'avalanche devra être étudié plus précisément.
3. La qualité des résultats n'a été évaluée précisément que dans les sept secteurs-tests. Les calculs portant sur l'« état réel » peuvent maintenant être confrontés avec les cadastres des avalanches disponibles dans toutes les Alpes suisses. Cette comparaison devrait aider à identifier les avantages et les inconvénients de la méthode de modélisation retenue. La détection des points faibles permettra d'améliorer le modèle existant et le choix des paramètres entrant dans les calculs.

4 Chute de pierres et de blocs

4.1 Bases de la modélisation pour le processus de chute

Vue d'ensemble des bases utilisées

Masque « rocher » de swisstopo: à l'impression des feuilles de la carte nationale au 1:25 000, swisstopo superpose un masque au relief nuancé (éclairage) pour améliorer la présentation de la carte en terrain rocheux. Les surfaces en question ont été utilisées pour déterminer les zones de rupture, dans lesquelles le modèle génère les points de départ des chutes de pierres.

Modèle Vector25-PR1 de swisstopo: sélection de couches représentant des surfaces primaires (rocher, éboulis, glaciers, lacs, marécages, forêts) et des objets particuliers (sommets et pieds de pentes). Ces surfaces servent à déterminer l'amortissement au sol dans la modélisation des chutes de pierres.

4.2 Description du processus

Les chutes de pierres et de blocs sont caractérisées par des mouvements isolés (chute, roulement, rebond) de composantes distinctes de taille allant jusqu'à plusieurs mètres cubes. Leur vitesse peut atteindre 30 m/s. Elles s'arrêtent généralement lorsque la déclivité de la pente devient inférieure à 30°. La forêt est susceptible de réduire considérablement leur énergie cinétique.

L'éboulement et l'éroulement comptent aussi parmi les processus de chute. Les chutes de pierres, les éboulements et les éroulements se distinguent habituellement par le volume de la masse en mouvement et par les mécanismes à l'œuvre durant sa chute.

Lors d'un éboulement, un grand compartiment rocheux plus ou moins fragmenté se détache en une fois du massif. Le volume mobilisé va généralement de cent mètres cubes à plusieurs centaines de milliers de mètres cubes. Contrairement à l'éroulement, les interactions entre les composantes en mouvement et les échanges d'énergie qui vont de pair sont faibles. Un éroulement se produit lorsqu'un compartiment rocheux de très grande taille (un à plusieurs millions de mètres cubes) se détache en une fois. Son mode de déplacement est déterminé, d'une part, par la topographie et, d'autre part, par la fragmentation de la masse et par les interactions entre les morceaux de roche.

La forêt n'offre aucune protection contre les éboulements de taille moyenne à grande, ni contre les éroulements. Par conséquent, seule la chute de pierres et de blocs a été modélisée dans le cadre de SilvaProtect-CH.

Étapes du traitement des données

1. Préparation des données de base (paramètres de terrain, points de départ)



2. Modélisation des zones de rupture, de transit et de dépôt des chutes de pierres: modèle **Geotest-Zinggeler** (Zinggeler, 1990)

4.3 Description de la modélisation

Les chutes de pierres et de blocs peuvent être modélisées de manière relativement fiable. Leur champ d'action est décrit le plus précisément en appliquant un modèle trajectographique tridimensionnel basé sur des paramètres physiques. Le calcul des trajectoires et des impacts au sol, qui permet de décrire la réalité d'une manière crédible, présente les avantages suivants par rapport aux approches du SIG et de la pente forfaitaire:

- concentration réaliste des trajectoires dans un relief complexe (avec franchissement éventuel de petites contrepentes);
- dissipation réaliste de l'énergie de chute dans les couloirs très encaissés (véritable « effet 3D »).

Le modèle de chutes de pierres Geotest-Zinggeler calcule les trajectoires de pierres et de blocs dans un modèle numérique de terrain (MNT) tridimensionnel. Des points de départ de densité donnée sont générés à l'intérieur de zones de rupture prédéfinies. A partir de ces points, le modèle simule la chute de blocs sous la forme d'une succession d'impacts au sol ou contre des arbres, comme des trajectoires paraboliques et des phases de roulement. Les paramètres suivants ont être pris en compte:

- configuration du terrain (MNT, rugosité de la surface);
- taille et forme des blocs (masse, aptitude de rotation);
- amortissement du sol: capacité du sol à se déformer en absorbant de l'énergie au bloc en mouvement.

La densité des informations disponibles pour déterminer les paramètres entrant dans le modèle s'oriente selon la taille du secteur examiné et le but assigné à l'étude. Les modèles mis en œuvre dans le cadre de SilvaProtect-CH appliquent des valeurs standard devant fournir une valeur réaliste de la propagation maximale des projectiles. Le programme calcule des milliers de trajectoires, dont le recouvrement détermine le champ d'action des chutes de pierres.

Définition des points de départ et de la taille des blocs

Des points de départ distants de 20 m sont générés à l'intérieur de zones rocheuses définies (masque « rocher » de Swisstopo, voir le paragraphe 4.1). Cet intervalle dépend généralement de la taille et de la configuration de la zone de rupture – on applique un espacement de 4 à 10 m pour les cartes des dangers détaillées. Dans le cadre de SilvaProtect-CH, les calculs sont effectués à parti d'un bloc unitaire mesurant 1,2 x 1,1 x 1,0 m selon les axes principaux et pesant environ 2 800 kg. Les trajectoires calculées sont ainsi représentatives des chutes de blocs et des petits éboulements.

Amortissement au sol

Un bloc tombant dans une pente voit son énergie augmenter durant les phases de vol et diminuer lors des impacts au sol. La perte d'énergie est notamment déterminée par la déformabilité plastique du terrain. Le projectile s'enfoncé davantage dans un sol mou que dans un sol dur, en générant un déplacement de matériaux supérieur, donc une plus grande perte d'énergie.

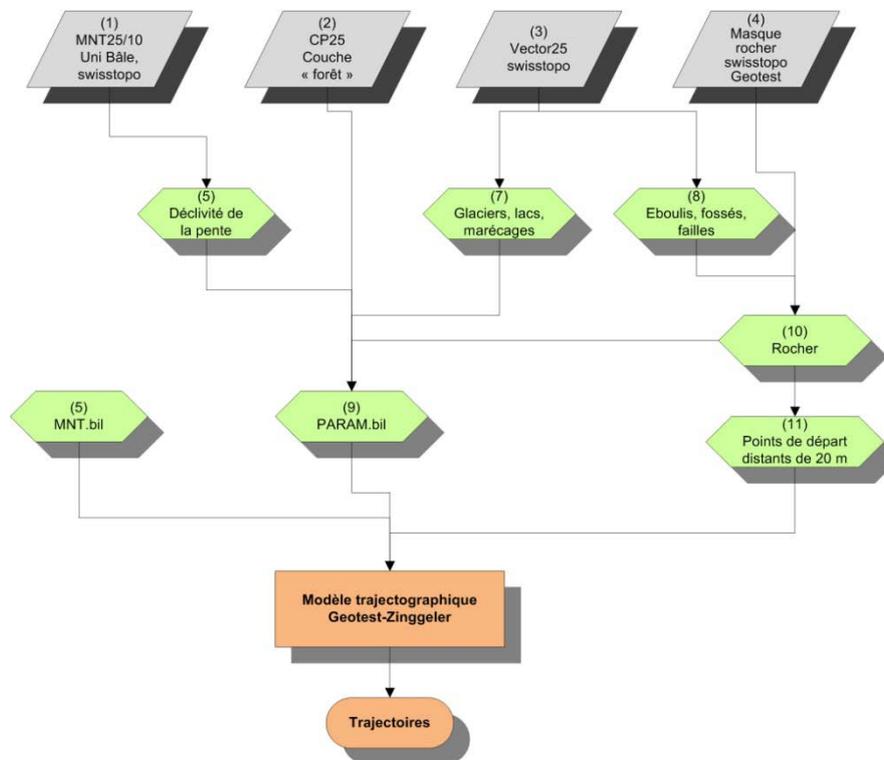


Figure 9: Méthode de modélisation des chutes de pierres et de blocs.

Pour modéliser les chutes de pierres et de blocs dans le cadre de SilvaProtect-CH, on a déterminé le coefficient d'amortissement au sol en considérant des plages de déclivité sommairement définies ainsi que la présence de surfaces boisées (figure 9).

Les critères empiriques suivants ont été pris en compte à cet effet:

- accumulation de matériaux meubles accrue dans les pentes de déclivité inférieure à 20°;
- accumulation de matériaux meubles accrue et ameublissement du sol par l'activité racinaire en zone boisée; rugosité et amortissement du sol accrus localement par la présence de bois mort éparpillé.

Cinq types de terrain, auxquels un coefficient d'amortissement spécifique a été assigné, découlent de la combinaison de ces règles générales. La figure 10 les présente schématiquement avec les coefficients d'amortissement typiques.

L'effet protecteur de la forêt n'a pas été pris en compte directement, par analogie avec la méthode appliquée pour élaborer les cartes indicatives des dangers dans les cantons, qui vise à localiser tous les conflits potentiels en considérant la portée maximale des chutes de blocs.

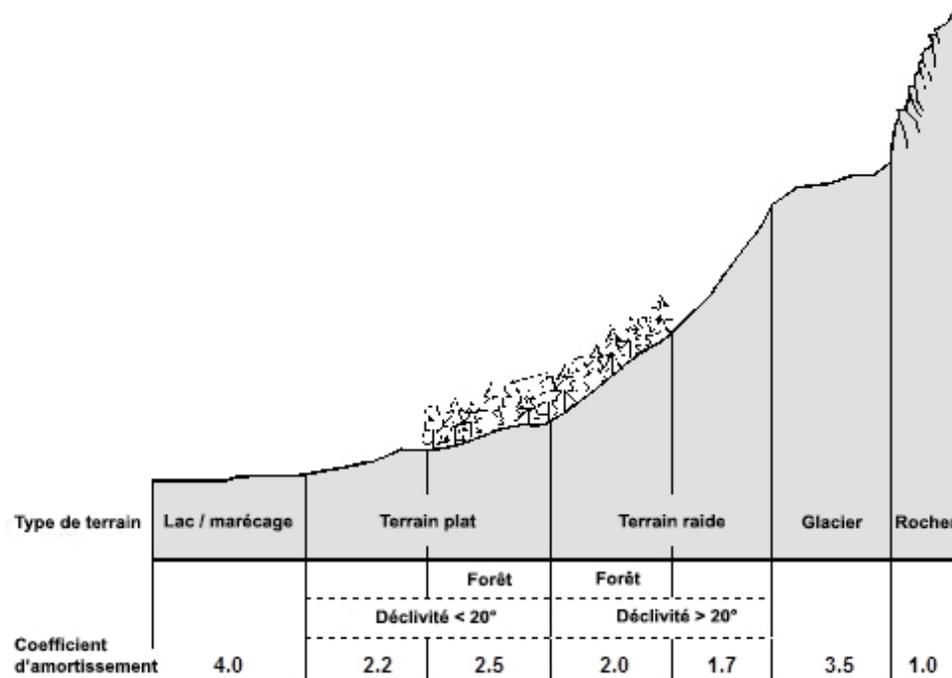


Figure 10: Subdivision du terrain en cinq types pour la modélisation à l'échelon de la carte indicative des dangers, sans cartographie sur le terrain.

Le modèle tridimensionnel Geotest-Zinggeler est une application en Turbo-Pascal qui effectue ses calculs « hors » de tout environnement SIG. Mais il requiert des fonctionnalités SIG avant et après la modélisation proprement dite.

4.4 Calibrage des paramètres du modèle

Le groupement de bureaux mandaté a mis en œuvre le modèle décrit depuis de nombreuses années dans le cadre de différents projets, qui consistaient principalement à dresser des cartes indicatives des dangers à l'échelle 1:25 000 (incluant parfois les forêts protectrices) dans certains cantons. Exemples: cartes indicatives des dangers sur Berne (1994-1998), Lucerne (1998-2001), Soleure (1999-2001), Zoug (2002-2003), Bâle-Campagne (2004-2005) et Argovie (2004-2005).

Le modèle Geotest-Zinggeler a aussi été appliqué pour réaliser plusieurs modélisations à grande échelle à l'étranger: Bad Reichenhall en Bavière (2004), carte des dangers à Klosters dans le Vorarlberg (2001), Chapman's Peak drive en Afrique du Sud (2002), etc.

Bien que le modèle utilisé ait fait ses preuves sur ces sites, une démarche en deux étapes a été privilégiée dans le cadre de SilvaProtect-CH: le modèle a d'abord été appliqué dans deux secteurs-tests sélectionnés (figure 11). Puis ses paramètres ont été fixés sur la base des résultats obtenus et toute la Suisse a été modélisée.

Cette démarche en deux temps semble appropriée pour vérifier l'éventuelle dégradation de la qualité lorsqu'on passe à l'échelle du pays, due à la simplification des paramètres du modèle (géologie à grande échelle) et à la baisse de densité des résultats dans l'espace (imputable à l'application).

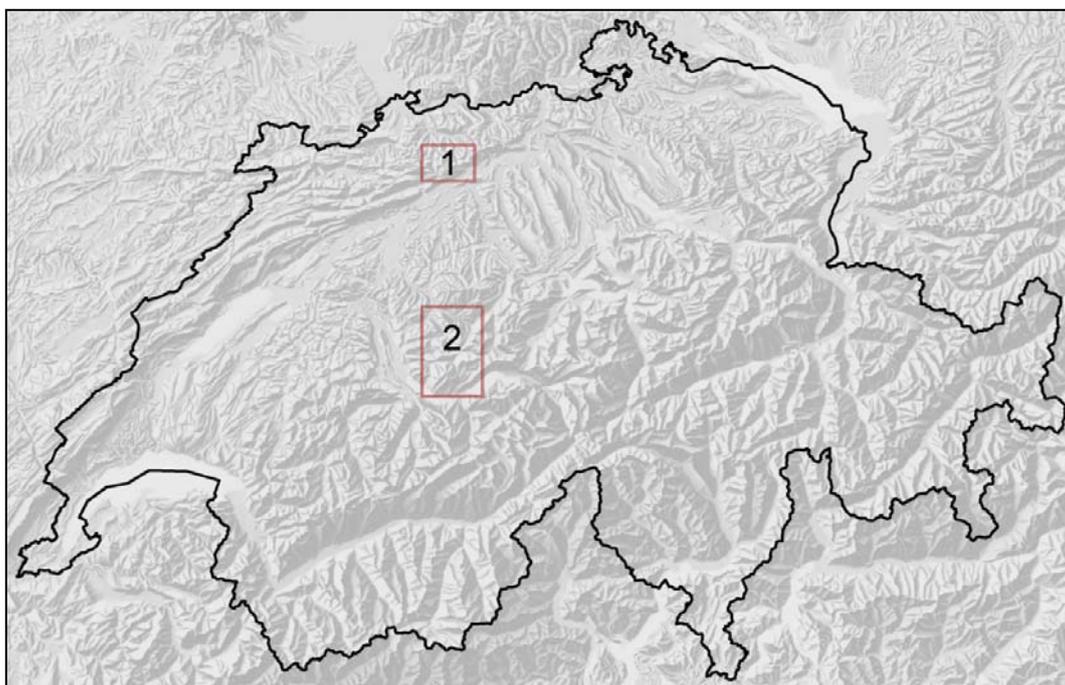


Figure 11: Emplacement des deux secteurs-tests utilisés pour calibrer le modèle de calcul des chutes de pierres.

Les résultats obtenus dans les deux secteurs-tests ont été évalués qualitativement par les spécialistes cantonaux. Après les avoir comparés visuellement avec les informations disponibles (cartes indicatives des dangers, cadastres des événements, etc.), ils les ont qualifiés de « bons », « suffisants » ou « insuffisants » en vue de la simulation à l'échelle de la Suisse (tableau 8).

N°	Nom	Région	Superficie [km ²]	Altitude [m]	Données disponibles	Evaluation qualitative des résultats
1	Hauenstein	Jura	210	380-1170	Carte indicative des dangers, cadastre des événements	Bons (niveau de la carte indicative)
2	Napf	Domaine nord-alpin et Préalpes	600	550-2300	Carte indicative des dangers, cartes des dangers, cadastre des événements	Bons (niveau de la carte indicative)

Tableau 8: Caractéristiques des deux secteurs-tests (figure 11) utilisés pour calibrer les paramètres. Le tableau comprend une évaluation qualitative émanant des spécialistes cantonaux.

4.5 Modélisation opérationnelle et qualité des résultats

Les trajectoires des chutes de pierres et de blocs ont été calculées automatiquement dans toutes les régions de la Suisse en appliquant la série de paramètres définie dans les secteurs-tests. Au total, 9,3 millions de trajectoires ont été calculées et enregistrées. Puis les forêts protectrices pertinentes en ont été déduites dans le module INTERSECT. Les trajectoires élargies par une zone tampon représentent la surface des processus.

Qualité des résultats

La figure 12 représente les trajectoires des chutes de pierres et de blocs dans un secteur riverain du lac de Thoue. L'enveloppe de toutes les trajectoires détermine les périmètres potentiellement exposés.

La modélisation de ce processus fournit notamment de bons résultats lorsque les zones de rupture potentielles sont bien appréhendées et que les paramètres de terrain (amortissement au sol, rugosité du sol) sont cartographiés de manière différenciée.

Les zones de rupture sont bien identifiées dans SilvaProtect-CH en appliquant le masque « rocher » et un intervalle de vingt mètres entre les points de départ. Mais les paramètres de terrain utilisés n'ont qu'une valeur standard, plutôt pessimiste (comme pour les cartes indicatives des dangers cantonales). Les champs d'action calculés indiquent donc les secteurs susceptibles d'être atteints lorsque les conditions sont défavorables.

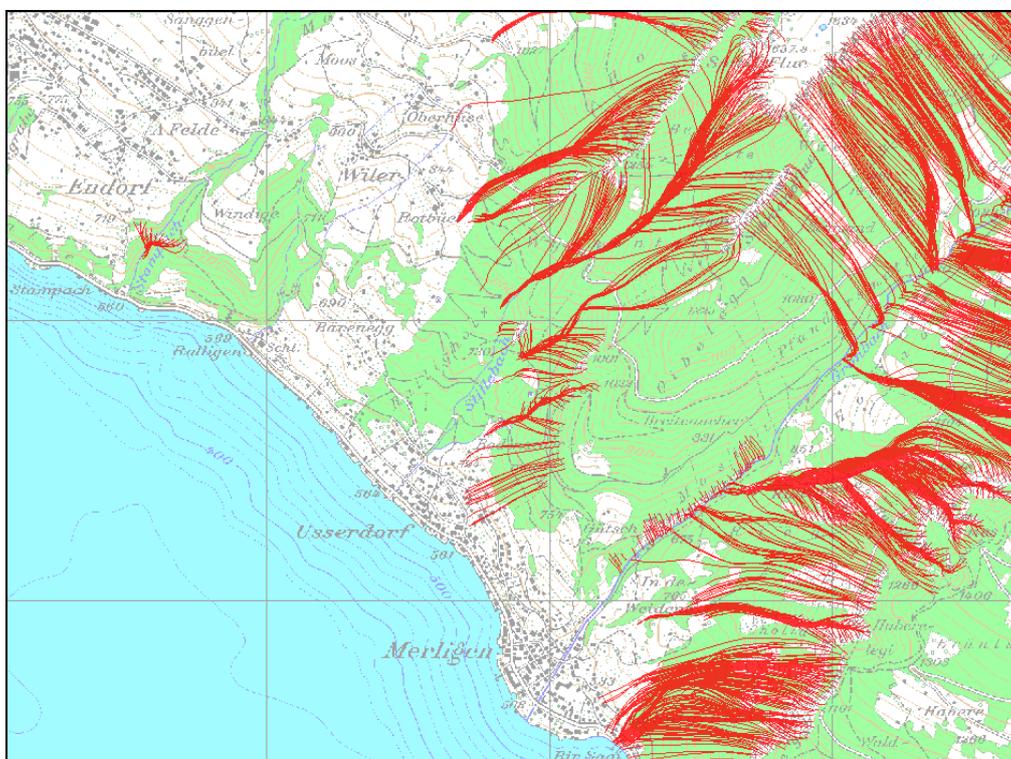


Figure 12: Trajectoires des chutes de pierres et de blocs (en rouge) dans le secteur de Merligen, riverain du lac de Thoue.

Les trajectoires simulées ne permettent pas de décrire les configurations topographiques dans le détail (MNT). Les ouvrages de protection n'ont pas été pris en compte dans la modélisation – hormis les grands remblais, tels que digues de protection, qui ressortent dans le MNT25 ou le MNT10.

Les résultats des simulations ne devraient donc être utilisés qu'au niveau de la carte indicative des dangers, ce qui correspond à une échelle de 1:25 000. Ils ne sont pas appropriés pour travailler à une échelle plus petite.

5 Coulée de boue / glissement de terrain

5.1 Bases de la modélisation du processus « coulée de boue »

Vue d'ensemble des bases utilisées

MNT10: différentes grandeurs auxiliaires nécessaires pour modéliser les processus ont été calculées à partir du MNT:

- déclivité et exposition de la pente;
- indice topographique (requis pour délimiter les zones d'arrachement de coulées de boue);
- réseau de ravines, cheminement des écoulements, taille du bassin versant (requis pour modéliser les laves torrentielles).

Masque « rocher » de swisstopo: à l'impression des feuilles de la carte nationale au 1:25 000, swisstopo superpose un masque au relief nuancé (éclairage) pour améliorer la présentation de la carte en terrain rocheux. Les surfaces en question ont été utilisées pour:

- délimiter les zones de rupture, à partir desquelles le modèle génère les points de départ des chutes de pierres;
- corriger les zones d'arrachement de coulées de boue modélisées;
- corriger / compléter les zones rocheuses selon la carte géotechnique de la CGS (estimation du charriage potentiel).

Modèle Vector25-PRI de swisstopo: sélection de couches représentant des surfaces primaires (rocher, éboulis, glaciers, lacs, marécages, forêts) et des objets particuliers (sommets et pieds de pentes). Ces surfaces servent à:

- déterminer l'amortissement au sol dans la modélisation des chutes de pierres;
- déterminer les zones d'arrachement de coulées de boue situées dans des éboulis;
- corriger les zones d'arrachement de coulées de boue modélisées (terrain meuble);
- déterminer le charriage potentiel et les zones d'arrachement de laves torrentielles.

Modèle Vector25-GWN de Swisstopo: le réseau hydrographique a servi à délimiter les bassins versants et à définir les réseaux de ravines.

Atlas hydrologique de la Suisse (HADES), planche 2.4, pluies ponctuelles extrêmes centennales sur 24 h: trois classes d'intensité (< 150 mm, 150-200 mm, > 200 mm) ont été saisies numériquement; l'angle de frottement a été ajusté aux classes > 150 mm pour modéliser les coulées de boue.

Division Gestion des espèces de l'OFEV, haut-marais, bas-marais, sites marécageux: ces surfaces ont servi à corriger les zones d'arrachement de coulées de boue définies par le modèle.

Division Prévention des dangers de l'OFEV, cadastre des événements StorMe: ces données ont servi à vérifier la pertinence des résultats de la modélisation de tous les processus.

Carte géotechnique de la Suisse à l'échelle 1:200 000 sous forme numérique éditée par la CGS (version 1/2000): les unités lithologiques ont été classées et assorties d'attributs en fonction de leur sensibilité à l'altération et de leur stabilité (frottement interne), puis elles ont été utilisées pour modéliser les coulées de boue et les laves torrentielles.

Traitement de la carte géotechnique de la CGS (figure 13)

Pour modéliser correctement les coulées de boue et les laves torrentielles, il faut disposer d'un MNT précis, mais aussi connaître impérativement l'influence du sous-sol ou de la couche de couverture.

Or il se fait que la couverture géologique de la Suisse à l'échelle 1:25 000 (celle des cartes indicatives des dangers) est incomplète (des feuilles de l'atlas manquent encore). De plus, seule une petite partie des feuilles publiées existe sous forme numérique (vectorielle).

Pour pouvoir traiter la géologie numériquement d'une manière uniforme dans toute la Suisse à un prix raisonnable, il faut appliquer des bases très générales.

C'est pourquoi la Carte géotechnique de la Suisse sous forme numérique, éditée par la Commission géotechnique suisse (CGS), a été utilisée comme base pour traiter la géologie.

La figure 13 expose les étapes du traitement des données tirées de la carte géotechnique de la CGS qui ont été utilisées dans la modélisation des laves torrentielles. Les imprécisions dues à l'échelle ont été corrigées au moyen de données provenant du modèle Vector25 là où c'était possible (frontières, lacs, glaciers, etc.).

Le tableau annexé « Nouvelles classes de la Carte géotechnique de la Suisse éditée par la CGS » indique comment les 69 unités géotechniques ont été regroupées et réparties sommairement en classes en fonction de la production d'éboulis, de la structure (matrice) et de la perméabilité de la roche altérée.

La géologie ainsi traitée a été intégrée directement dans la modélisation des laves torrentielles.

La géologie a été traitée sensiblement de la même manière pour modéliser les coulées de boue, si ce n'est que la géométrie n'a été corrigée qu'après la modélisation, en utilisant des « masques de recouvrement ».

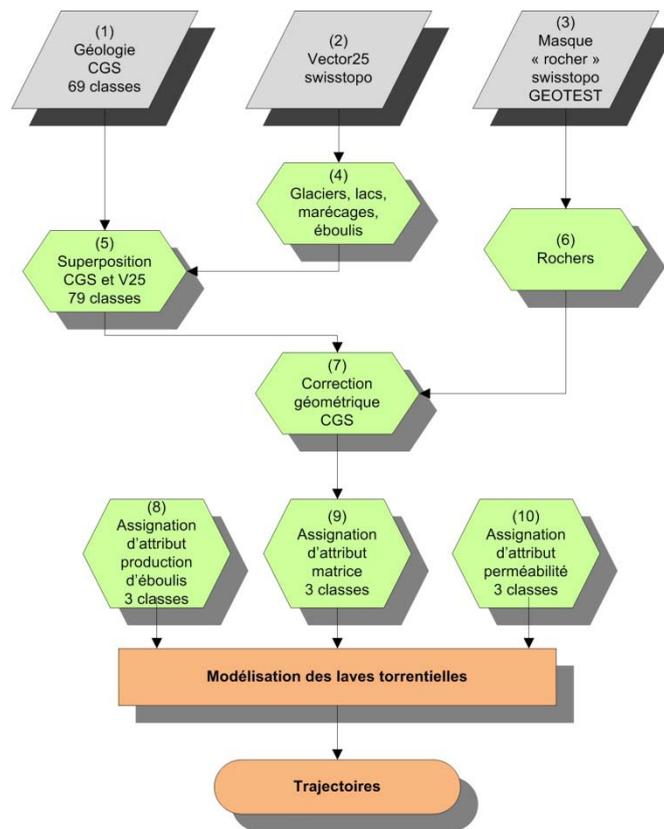


Figure 13: Traitement des données provenant de la carte géotechnique de la CGS (correction de la géométrie et classement des lithologies).

Prise en compte des ouvrages de protection

Les ouvrages de protection érigés en maints endroits pour lutter contre les glissements de terrain, les chutes de pierres et les crues n'ont pas été pris en compte dans le cadre de SilvaProtect-CH. Seuls ont été considérés ceux qui ressortent dans le MNT10, soit les grands remblais, tels que digues de protection, murs de soutènement et ouvrages similaires. Les champs d'action calculés indiquent donc les secteurs susceptibles d'être menacés par un danger (indication des dangers).

Les glissements de terrain sont des mouvements de compartiments rocheux ou meubles vers l'aval, dans des pentes de déclivité moyenne à forte, qui résultent d'une rupture par cisaillement à la base de la masse mobilisée. Les instabilités naturelles de ce type, fréquentes en Suisse, revêtent toutes sortes de formes. Bon nombre de glissements de terrain sont anciens et sensiblement immobiles à l'heure actuelle (« latents »), mais ils peuvent se réactiver progressivement ou brusquement. L'eau joue généralement un rôle prépondérant dans les glissements de terrain, par l'intermédiaire de la pression interstitielle, des forces de percolation ou de la pression due au gonflement de minéraux argileux.

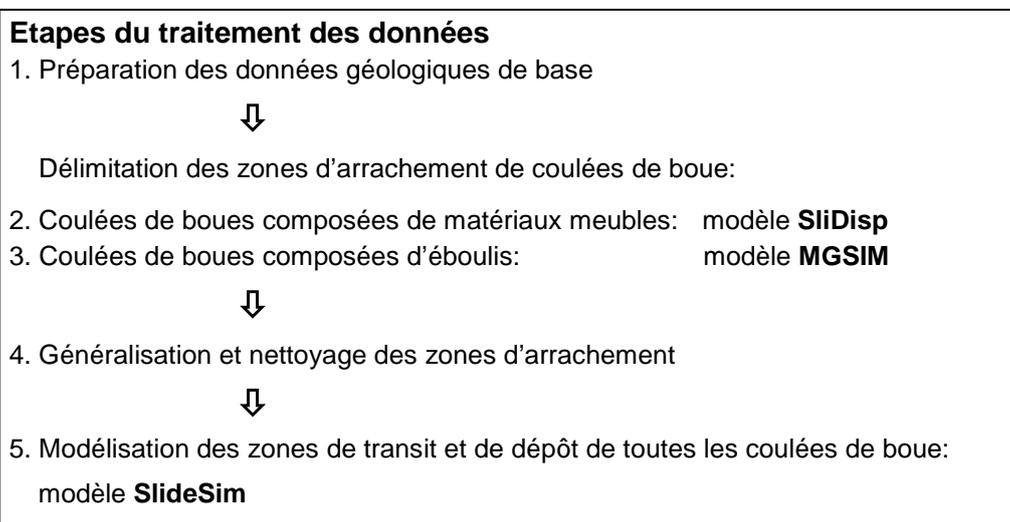
5.2 Description du processus

Les coulées de boue qui se produisent dans une pente ouverte, hors de tout chenal, revêtent une importance particulière. Ce sont des mélanges de terrain meuble (généralement composés seulement

de sol et de la végétation) et de beaucoup d'eau qui s'écoulent rapidement à la surface du sol. Leur teneur en eau relativement élevée leur confère une vitesse élevée (1-10 m/s), ce qui les rend très destructrices. C'est aussi à cause de l'eau que la surface atteinte est fréquemment dix à cent fois plus étendue que la zone d'arrachement, habituellement très restreinte. Lorsqu'une coulée de boue rejoint un chenal, elle peut contribuer à la formation d'une grande lave torrentielle.

Les pentes recouvertes de formations quaternaires peu perméables, sensibles à l'érosion, sont les plus prédisposées aux coulées de boue. Souvent, ce processus naît dans une zone sourcière ou émane d'un glissement de terrain superficiel. Les coulées de boue se déclenchent lors de précipitations intenses, suite à des pluies persistantes ou lors d'une fonte rapide du manteau neigeux.

Seuls les glissements de terrain superficiels, spontanés, et les coulées de boue ont été modélisés dans le cadre du présent projet. D'une part, les coulées de boue ont un grand pouvoir destructeur et sont parfois annonciatrices de laves torrentielles. D'autre part, la présence d'une forêt intacte dans la zone d'arrachement potentielle peut freiner considérablement leur formation.



5.3 Description de la modélisation de l'arrachement

Le traitement du processus « coulée de boue / glissement de terrain » contient les coulées de boue, les glissements de terrain spontanés et les laves torrentielles. La forêt n'influence guère les glissements permanents semi-profonds à profonds. C'est pourquoi la présente étude ne les a pas considérés.

L'étude des coulées de boue et des glissements de terrain a principalement consisté à délimiter les zones d'arrachement et de dépôt, en tenant compte du sous-sol géologique et d'autres facteurs susceptibles de les influencer (végétation, précipitations).

Les zones d'arrachement ont été modélisées avec le modèle SliDisp (Liener, 2000), qui détermine la stabilité de la pente pour chaque cellule de la grille en appliquant la méthode d'analyse de la stabilité

d'une pente infinie. Les paramètres requis ont été tirés des données géologiques numériques disponibles et introduits dans le modèle pour tout le périmètre traité. Les paramètres déterminants sont la déclivité de la pente, calculée à partir du modèle numérique de terrain, et les paramètres de cisaillement du sous-sol géologique (cohésion et angle de frottement).

Le facteur de sécurité F d'une cellule est égal au rapport entre les forces résistantes et les forces motrices, selon la formule de la figure 14.

L'importante variabilité naturelle des paramètres de cisaillement (cohésion et angle de frottement) a été prise en compte en appliquant des fonctions de répartition à chaque classe géotechnique, et non pas en leur assignant une valeur fixe. Pour déterminer la prédisposition au glissement, le modèle a choisi, de manière répétée, une valeur dans ces répartitions, puis a calculé le facteur de sécurité F correspondant à chaque cas. Cette simulation de type Monte-Carlo permet de tenir compte de la dispersion naturelle de certains paramètres entrant dans les calculs.

Le présent modèle admet que la cohésion et l'angle de frottement suivent des distributions normales et qu'ils ne sont pas corrélés entre eux. Or ces hypothèses ne sont pas tout à fait avérées dans la nature, si bien que les calculs de stabilité les invoquant risquent de fournir des valeurs trop hautes ou trop basses. Mais comme les calculs appliquent de nombreuses combinaisons de paramètres, ces valeurs trop faibles ou trop élevées se compensent et les probabilités inhérentes à la distribution des facteurs de sécurité restent similaires.

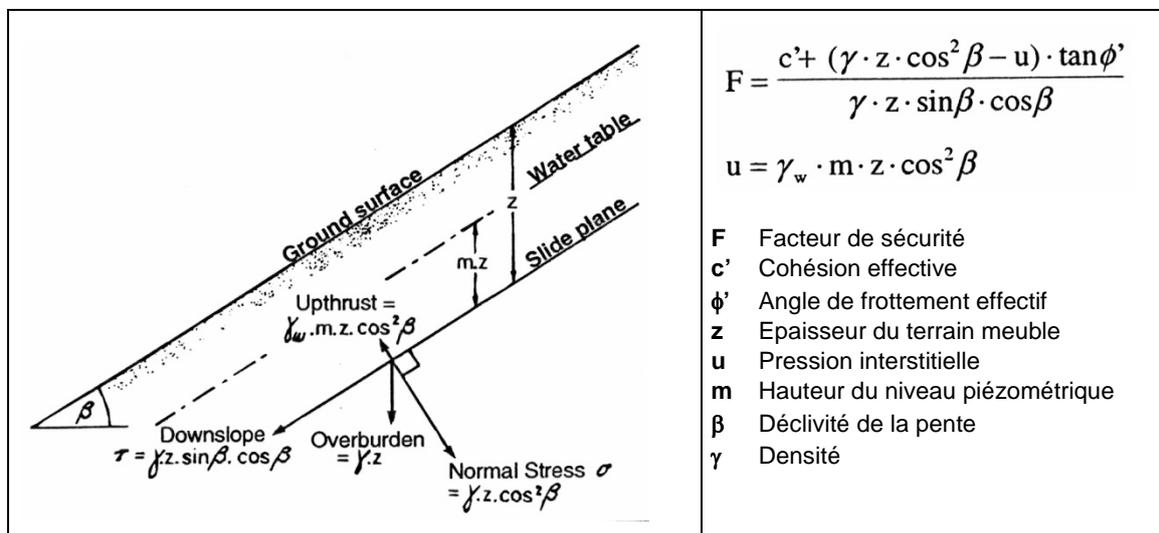


Figure 14: Calcul du facteur de sécurité F (tiré de Selby, 1993).

Pour établir la prédisposition au glissement, on a calculé 100 coefficients de sécurité pour chaque cellule à partir de valeurs aléatoires provenant des fonctions de distribution des paramètres de cisaillement. Puis on a déterminé le nombre de cas pour lesquels $F < 1$, qui correspondent à une instabilité. Plus le nombre d'instabilités est grand, plus la probabilité de glissement est élevée. Sont considérés

comme zones d'arrachement potentielles les secteurs dans lesquels plus de 60 % des combinaisons de paramètres donnent un facteur de sécurité $F \leq 1$.

Préparation de la modélisation de l'arrachement pour les coulées de boue

La figure 15 illustre toutes les étapes du traitement (en vert) des données de base utilisées (en gris).

Elles comprennent une préparation des données avant la modélisation avec SliDisp et un traitement des résultats obtenus après la simulation.

Avant de procéder à la modélisation, il faut essentiellement définir les trois paramètres : frottement interne Φ (angle de frottement effectif Φ'), épaisseur du terrain meuble z et hauteur du niveau piézométrique m selon la figure 14. La hauteur du niveau piézométrique m situe la partie saturée de la couche de terrain meuble. Elle est fixée en tenant compte de la perméabilité des matériaux (voir les nouvelles classes de la Carte géotechnique de la Suisse CGS figurant en annexe).

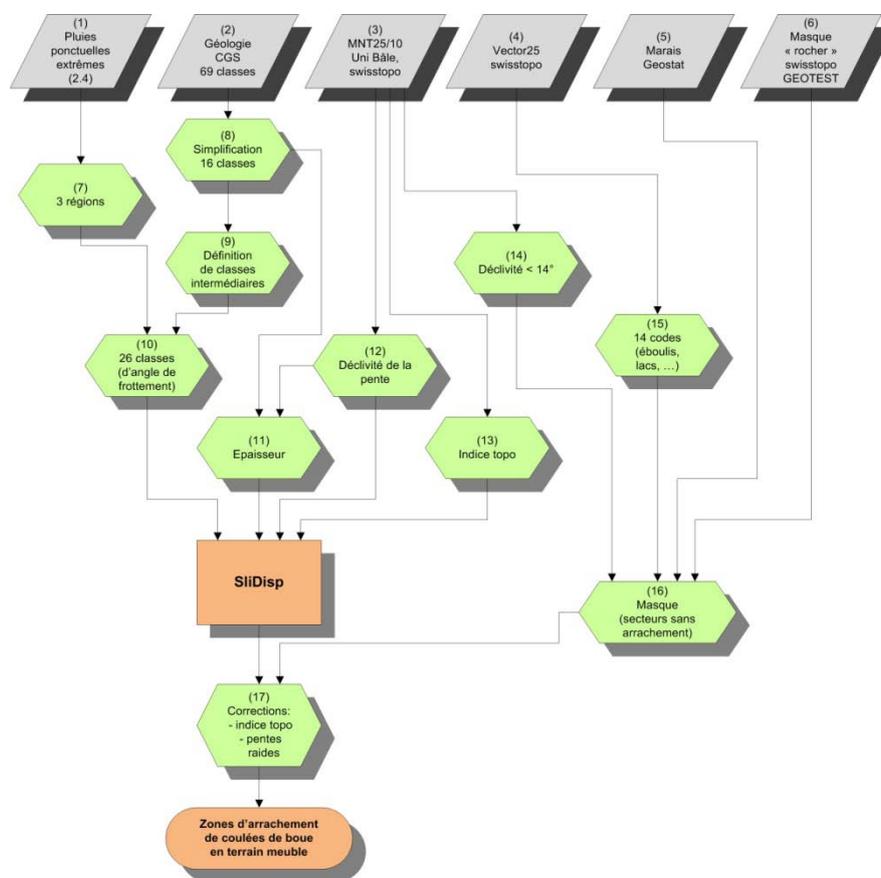


Figure 15: Méthode appliquée pour modéliser les zones d'arrachement en terrain meuble dans le cas des coulées de boue.

Distribution des pluies extrêmes ponctuelles (HADES)

Dans le modèle SliDisp, la pression interstitielle régnant dans les terrains meubles est une grandeur décisive. Leur résistance dépend étroitement, entre autres, de leur épaisseur et de leur teneur en eau. Or la teneur en eau varie tellement dans le temps qu'elle ne peut guère être déterminée d'une manière fiable. C'est pourquoi les calculs sous SliDisp n'ont pas considéré le paramètre très sensible de la

cohésion (donc la cohésion est égale à 0, ce qui correspond à un terrain saturé). Pour en tenir quand même compte, on l'a estimée sommairement en fonction des précipitations extrêmes (pluies ponctuelles extrêmes selon l'HADES).

La teneur en eau d'un sol donné peut atteindre une valeur critique de diverses manières, telles que précipitations persistantes d'intensité moyenne ou pluies fortes mais brèves. Du fait du drainage, la teneur en eau du sol ne dépend pas seulement des précipitations cumulées, mais aussi de leur intensité (précipitations par unité de temps). C'est pourquoi le danger de coulée de boue est supérieur dans un périmètre soumis à des pluies ponctuelles extrêmes.

Le périmètre étudié a donc été subdivisé en trois zones d'après la carte des pluies ponctuelles extrêmes (Atlas hydrologique de la Suisse, HADES, planche 2.4, pluies ponctuelles extrêmes centennales sur 24 h):

- Zone 1: quantité de précipitations < 150 mm
- Zone 2: quantité de précipitations = 150-200 mm
- Zone 3: quantité de précipitations > 200 mm

Les isolignes correspondantes ont été numérisées et la figure 16 représente la répartition de ces 3 zones.

Puis l'angle de frottement interne Φ a été corrigé vers le bas pour toutes les unités géologiques se trouvant dans les zones 2 (150-200 mm) et 3 (> 200 mm) en fonction des résultats des modélisations tests ; c'est-à-dire, une diminution de 2° respectivement de 3° par rapport aux unités géologiques de base (régions dans la zone 1).

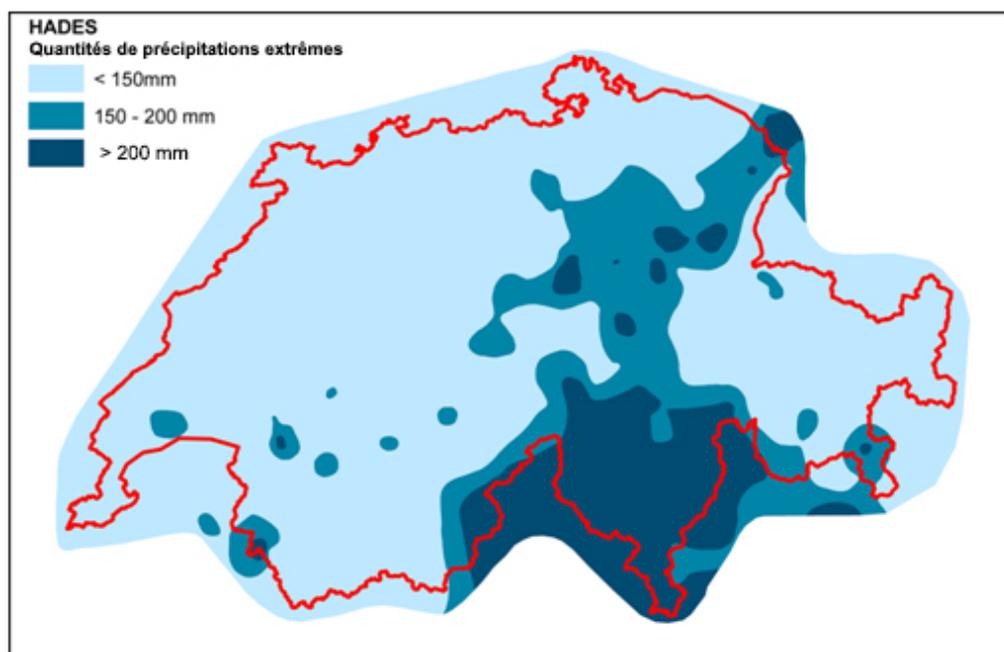


Figure 16: Quantités de précipitations extrêmes (HADES, planche 2.4: 24h / 100 ans).

Suite du traitement de la Carte géotechnique de la Suisse CGS

La nouvelle Carte géotechnique de la Suisse distingue 69 unités géologiques-géotechniques. Les deux paramètres angle de frottement interne et perméabilité entrant dans la modélisation ont d'abord été déterminés pour chaque unité, sur la base de divers documents et expertises géotechniques ; la perméabilité étant décrite par une valeur entre 0 et 1 (0 \approx imperméable, 1 \approx perméable). Puis les unités lithologiques similaires ont été regroupées. Il en a résulté 16 classes géotechniques (étape 8 de la figure 15), dont les paramètres entrant dans la modélisation diffèrent notablement. Pour atténuer les sauts parfois très marqués entre elles, dix classes intermédiaires caractérisées par des angles de frottement et des perméabilités échelonnées (classes 17-26, étape 9 de la figure 15) ont été ajoutées dans un deuxième temps. Enfin, les eaux superficielles et les glaciers ont été ajoutés à la liste, ce qui porte à 28 le nombre de classes obtenues de la carte géotechnique.

Le tableau 9 donne un aperçu des unités définies (le tableau complet figure au chapitre 10.1 « Nouvelles classes de la Carte géotechnique de la Suisse »).

Nouvelle classe	Roche, sous-sol	Attribut GEOTECH (unité géotechnique) Carte géotechnique de la SGS	Frottement interne Φ [°]	Perméabilité [0 à 1] 0 \equiv imperméable 1 \equiv perméable	Production d'éboulis 1 = faible 2 = moyenne 3 = forte	Matrice 1 = argile-limon 2 = sable-gravier 3 = gravier-blocs
1	Roches argileuses	13,14,18,30,112	19	0,25	3	1
2	Marne argileuse	12,15,17	21	0,30	3	1
...						
...						
21	Interm. ($\Phi = 27-29^\circ$)	-	28	0,60		

Tableau 9: Aperçu des classes obtenues de la carte géotechnique de la CGS et de leurs attributs.

Dans la troisième et dernière étape, les données sur les précipitations, réparties en trois zones, ont été superposées aux 28 classes géotechniques. C'est ainsi que les modélisations ont été effectuées sur les 78 classes géologiques-géotechniques-hydrologiques ainsi que sur les eaux superficielles et sur les glaciers.

L'épaisseur des terrains meubles entre également dans les calculs. Dans la modélisation, elle est étroitement liée à la perméabilité et à la cohésion. Comme déjà mentionné dans le paragraphe Distribution des pluies extrêmes ponctuelles, la cohésion est un paramètre extrêmement sensible. Mais comme les informations à son sujet sont très sommaires, les modélisations réalisées dans le cadre de ce projet ont considéré que les matériaux n'avaient « aucune cohésion ». Ainsi, l'épaisseur du terrain n'a qu'une faible incidence sur les résultats des calculs.

La Carte géotechnique de la Suisse n'indique pas l'épaisseur des terrains meubles situés en dessus de la roche solide. C'est pourquoi cette épaisseur a été déduite des produits d'altération des différentes lithologies et de la déclivité de la pente.

L'expérience montre que les pentes raides n'ont qu'une mince couche de terrain meuble, alors que dans les secteurs plats comme les fonds de vallée, cette couche est épaisse. La déclivité de la pente

a donc été subdivisée en quatre classes (< 14°, 14-40°, 40-50° et > 50°) sur la base de la littérature spécialisée, de diverses expertises géologiques et de valeurs empiriques. Les épaisseurs de terrain meuble ont ensuite été assignées à chacune des 16 classes lithologiques. Le tableau 10 donne un aperçu des épaisseurs attribuées (le tableau complet figure dans le chapitre 10.1).

Nouvel- le clas- se	Roche, sous-sol	Attribut GEOTECH (unité géotechnique) Carte géotechnique de la CGS	Epaisseur [m]			
			pour une déclivité de			
			< 14°	14° - 40°	40° - 50°	> 50°
1	Roches argileuses	13,14,18,30,112	10,0	1,0	0,5	0,2
2	Marne argileuse	12,15,17	10,0	2,0	1,0	0,2
...						

Tableau 10: Matrice de détermination de l'épaisseur des terrains meubles.

Réduction des zones d'arrachement à l'aide de l'indice topographique

A partir du MNT, l'indice topographique (figure 15), qui définit pour chaque cellule du modèle la teneur potentielle en eau liée à la topographie, est calculé de la manière suivante:

$$\text{Indice topographique} = \ln(a / \tan \beta) \quad \text{avec:}$$

a = surface drainée par la cellule considérée
 β = déclivité de la cellule considérée

Le modèle SliDisp utilise l'indice topographique pour corriger la perméabilité assignée automatiquement à chaque classe de sous-sol.

L'indice topographique sert aussi à réduire les zones d'arrachement de coulées de boue définies par le modèle sur les crêtes (indice topographique = 0 quand $a = 0$).

Réduction des zones d'arrachement en diminuant la proportion de cellules (valeur $F \leq 1$)

Il est nécessaire de réduire les zones d'arrachement définies par le modèle car l'approche choisie, qui ne tient compte ni de la cohésion ni de l'épaisseur des terrains meubles, génère toujours des départs de coulée de boue dans les pentes raides, quel que soit l'angle de frottement assigné, ce qui ne reflète pas la réalité.

La figure 17A présente la situation avant réduction: sont signalées comme zones d'arrachement de coulées de boue toutes les cellules dont l'instabilité modélisée est $\geq 60\%$; c'est-à-dire que plus de 60 valeurs F calculées sur 100 sont ≤ 1 .

Les figures 17B et 17C illustrent le principe de réduction linéaire des instabilités modélisées (proportion de cellules calculées avec une valeur $F \leq 1$) dans les pentes de déclivité supérieure à 35°:

Aucune réduction n'a été opérée dans les pentes de déclivité inférieure à 35°, alors qu'on a appliqué un facteur maximal de 0,9 lorsque la déclivité était supérieure ou égale à 65°.

La figure 17B illustre la réduction lorsque la proportion d'instabilités calculée atteint 100 %: pour une déclivité inférieure à 48,3°, la proportion d'instabilités reste supérieure à 60 % après réduction, alors qu'elle passe sous le seuil des 60 %, signifiant qu'aucune zone d'arrachement n'est définie, lorsque la déclivité est supérieure à 48,3°. L'instabilité maximale correspondant à la proportion calculée de 100 % est indiquée par un cercle rouge.

La figure 17C illustre le même principe pour une proportion d'instabilités calculée de 80 %. Dans ce cas-là, la pente instable maximale correspondant est de 43,3°. L'instabilité maximale correspondant à la proportion calculée de 80 % est à nouveau indiquée par un cercle rouge.

La figure 17D illustre la situation après réduction: la ligne rouge construite à l'aide de tous les points d'instabilité maximale entre les proportions de 60 % et 100 % (cercles rouges) délimite les instabilités subsistant après réduction: pour une proportion donnée de cellules instables ($F \leq 1$) calculée avec SliDisp, le graphique indique la déclivité maximale au-delà de laquelle aucune zone d'arrachement de coulées de boue n'est définie.

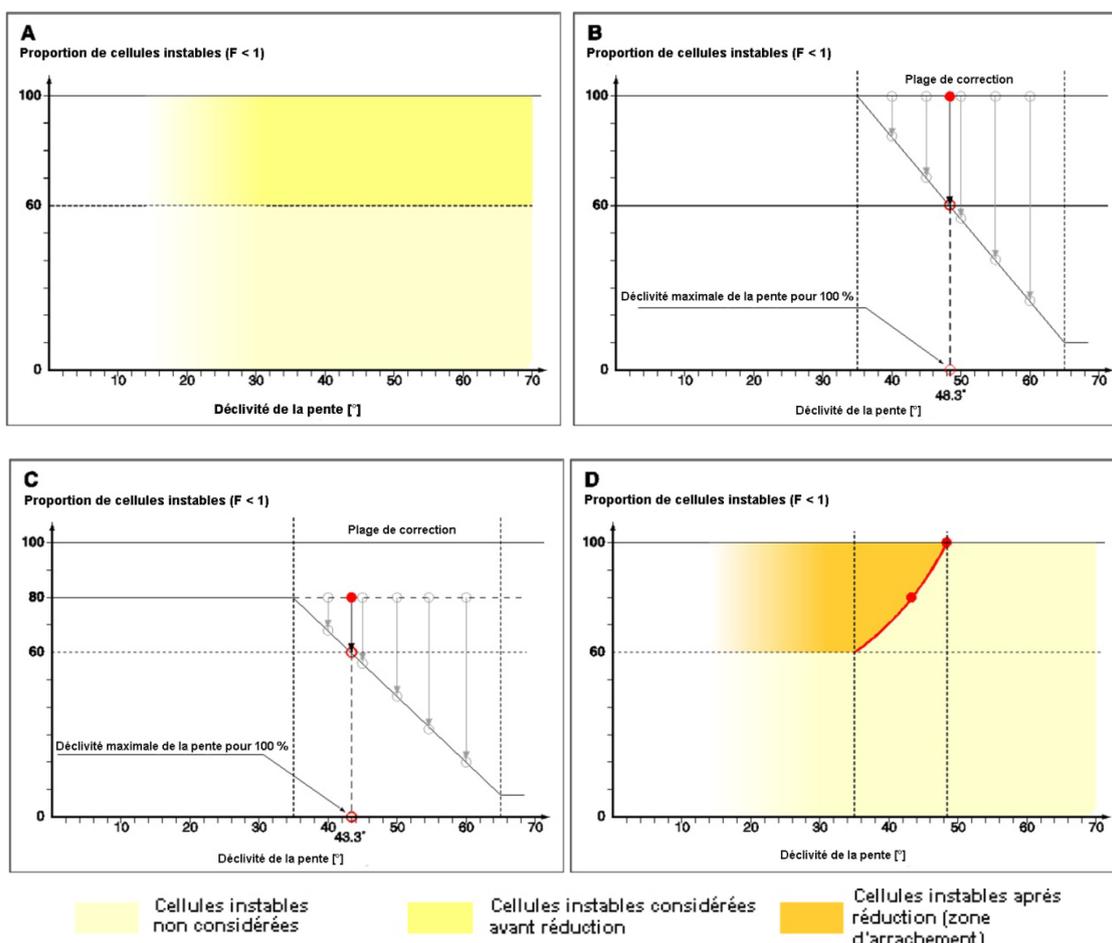


Figure 17: Réduction des zones d'arrachement dans les surfaces de déclivité supérieure à 35°.

Zones d'arrachement de coulées de boue dans des éboulis

Les pentes raides comportant des matériaux meubles peu consolidés (moraines ou remplissages de vallées glaciaires) et les passages entre une paroi rocheuse et un éboulis peuvent être sujets à des coulées de boue lorsque les matériaux meubles sont saturés en eau. Les conditions hydrologiques jouent un rôle prépondérant dans le déclenchement de ces coulées de boue liées à des éboulis, comme dans le cas des laves torrentielles. C'est pourquoi leur zone d'arrachement a été délimitée comme la zone de départ des laves torrentielles (voir le chapitre 6 pour une description détaillée). Leur formation dépend du type de matériaux mobilisables, de la déclivité de la pente, de la direction d'écoulement et de la taille du bassin versant, respectivement le débit potentiel. Si certains seuils empiriques sont dépassés (tableau 11), des zones d'arrachement ont été définies dans les éboulis.

Zone d'arrachement	Conditions
Terrain meuble / éboulis	<ul style="list-style-type: none"> - Présence d'un éboulis ouvert (Vector25) - Déclivité de la pente entre 27° et 38° - Taille du bassin versant au minimum 0,5 ha
Passage du rocher à un éboulis	<ul style="list-style-type: none"> - Présence d'un éboulis ouvert (Vector 25) - Déclivité de la pente > 25° - Taille du bassin versant au minimum 0,5 ha - Rocher à l'aplomb de la zone d'arrachement

Tableau 11: Vue d'ensemble des types de zones d'arrachement de coulées de boue dans des éboulis.

Les zones d'arrachement doivent avoir une taille minimale pour être significatives. C'est pourquoi seules celles ayant une superficie d'au moins 300 m² ont été prises en considération.

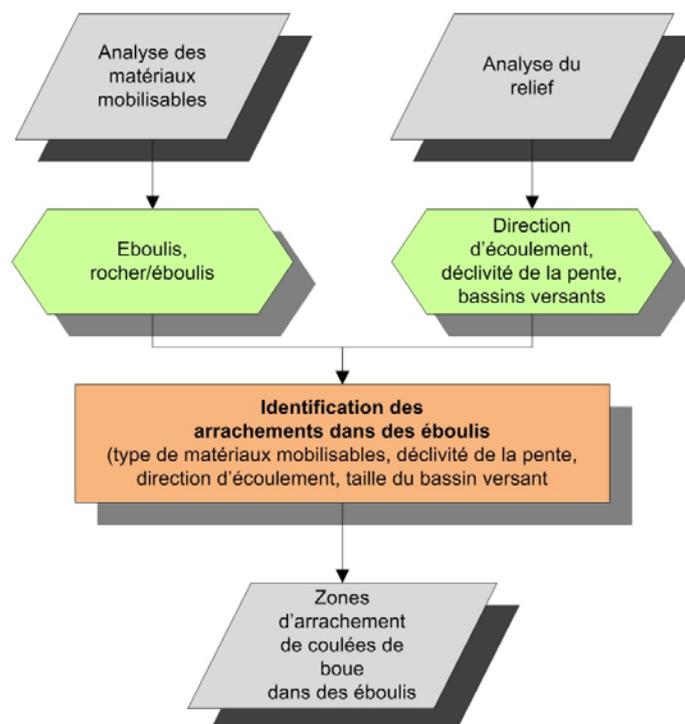


Figure 18: Méthode de modélisation des zones d'arrachement de coulées de boue dans des éboulis

5.4 Description de la modélisation du dépôt

Les éventuelles zones de transit et de dépôt des coulées de boue et des glissements de terrain superficiels spontanés ont été simulées avec le modèle SlideSim (développé par Geo7 AG) en partant des zones d'arrachement définies précédemment (coulées de boue « classiques » et à partir d'éboulis). Comme les coulées de boue se comportent de la même manière que les laves torrentielles dans la zone de dépôt, les principes du modèle dfwalk (Gamma, 2000) décrivant les laves torrentielles ont été repris et adaptés aux caractéristiques des coulées de boue. Le modèle appliqué a été calibré en exploitant les analyses d'événements qui se sont produits en 2002, suite à des intempéries, dans la région du Napf et dans le canton d'Appenzell (Geo7 et al., 2003; OFEG, 2003).

Elément du modèle: détermination de la propagation

La propagation des coulées de boue a été simulée au moyen d'une approche de type parcours aléatoire, basée sur la topographie et sur la déclivité de la pente et tenant compte des paramètres de propagation (facteur de propagation, facteur de persistance, pente limite). La probabilité qu'une cellule de la grille soit choisie pour poursuivre l'écoulement dépend, d'une part, de la déclivité de la pente et, d'autre part, de la direction suivie jusqu'ici par le processus (persistance) et du facteur de propagation.

Les « successeurs » possibles d'une cellule ont été choisis en appliquant une méthode multidirectionnelle développée par le bureau Geo7 AG, qui ne permet à la coulée de boue de se poursuivre que si la déclivité de la pente atteint une valeur critique. Cela implique que les processus s'écoulant sur un terrain raide (proche de l'angle limite) suivent principalement la ligne de pente. Dans un terrain moyennement raide, les cellules voisines moins pentues peuvent aussi être empruntées par l'écoulement. Dans un terrain plat, les coulées de boue peuvent se propager pratiquement dans toutes les directions.

Elément du modèle: détermination de la portée

La portée des coulées de boue a été déterminée au moyen de l'approche analytique simple de Voellmy. Ce modèle est basé sur deux paramètres de frottement (coefficient de frottement par glissement μ , valeur du frottement interne M/D) devant être déterminés empiriquement. Ils ont été obtenus à partir de tirés d'analyses d'événements lors d'intempéries (p. ex. Napf 2002).

Le modèle SlideSim calcule la vitesse des coulées de boue tronçon par tronçon le long de leur trajectoire, selon la méthode à deux paramètres. Dès que leur vitesse tombe à zéro, la modélisation s'arrête. La teneur en eau des masses en mouvement peut varier d'un événement à l'autre. La plus part du temps et selon la configuration du terrain, elle influence fortement la portée des petites coulées de boue. Lorsque ces dernières sont saturées d'eau, il arrive souvent que l'extrémité de la zone de dépôt soit composée uniquement d'eau boueuse.

Simulation avec le programme SlideSim

Le dépôt des coulées de boue a été simulé avec le programme SlideSim, selon les trois étapes principales suivantes:

- La première a consisté à établir les cheminements possibles des écoulements sans tenir compte de leur portée. Pour ce faire, on a déterminé un cheminement possible à partir d'un pixel de départ (« pixel d'arrachement »), en appliquant la méthode de la pente forfaitaire et l'approche de type parcours aléatoire, puis on l'a enregistré dans une couche au format raster. Ses paramètres – Δh , Δl et la taille du bassin versant – ont été consignés dans un tableau. On a conféré une valeur très basse à la pente forfaitaire pour s'assurer de disposer de toutes les valeurs nécessaires pour simuler ensuite la portée.
- Dans la deuxième étape, la portée des coulées de boue a été simulée à l'aide du modèle à deux paramètres tout en utilisant le tableau des paramètres de cheminement.
- Dans la troisième étape, la portée calculée a été reportée sur le cheminement déterminé à la première étape. On a obtenu ainsi la trajectoire de chaque coulée de boue.

Chaque pixel de départ a été soumis une fois à ce traitement. La zone de propagation potentielle a été circonscrite en superposant les trajectoires voisines.

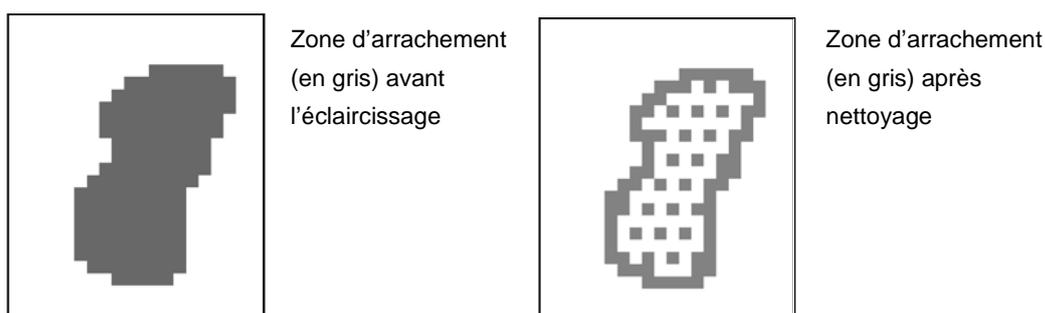


Figure 19: Nettoyage des zones d'arrachement de coulées de boue.

Les zones d'arrachement ont été nettoyées avant de modéliser les zones de dépôt, ceci afin de réduire autant que possible le nombre de trajectoires: toutes les surfaces ont été éclaircies selon le schéma de la figure 19 de manière à n'introduire dans le modèle que le contour des zones d'arrachement et une grille lâche à l'intérieur de celles-ci (dessin de droite de la figure 19) pour simuler le départ des coulées de boue.

5.5 Calibrage des paramètres du modèle

Les modèles décrits sont utilisés depuis plusieurs années par le groupement de bureaux mandaté, essentiellement pour l'élaboration de cartes indicatives cantonales des dangers à l'échelle 1:25 000. Le modèle SliDisp (zones d'arrachement de coulées de boue et de glissements de terrain) a déjà été utilisé dans les cantons de Soleure, Zoug, Bâle-Campagne et Argovie, tandis que le modèle SlideSim

(dépôt de coulées de boue et de glissements de terrain) a été appliqué à grande échelle dans ceux d'Argovie et de St-Gall (région du lac Gaster) pour délimiter les zones de dépôt de coulées de boue. Il a aussi servi à élaborer les cartes de ces dangers dans plusieurs communes.

Bien que le modèle employé ait fait ses preuves sur ces sites, on a opté pour une démarche en deux étapes dans le cadre du projet SilvaProtect-CH: le modèle a d'abord été appliqué dans quatre secteurs-tests (figure 20). Sur la base des résultats obtenus, les paramètres ont été fixés et toute la Suisse a ensuite été modélisée.

Cette démarche en deux temps semble appropriée pour vérifier l'éventuelle dégradation de la qualité lorsqu'on passe à l'échelle du pays, due à la simplification des paramètres du modèle (géologie à grande échelle) et à la baisse de densité spatiale des résultats (nécessitée par l'application).

Les résultats obtenus dans les quatre secteurs-tests ont été évalués qualitativement par les spécialistes cantonaux. Après les avoir comparés visuellement avec les informations disponibles (cartes indicatives des dangers, cadastres des événements, etc.), ils ont qualifiés ces résultats de « bons », « suffisants » ou « insuffisants », en vue de la simulation à l'échelle nationale (tableau 12).

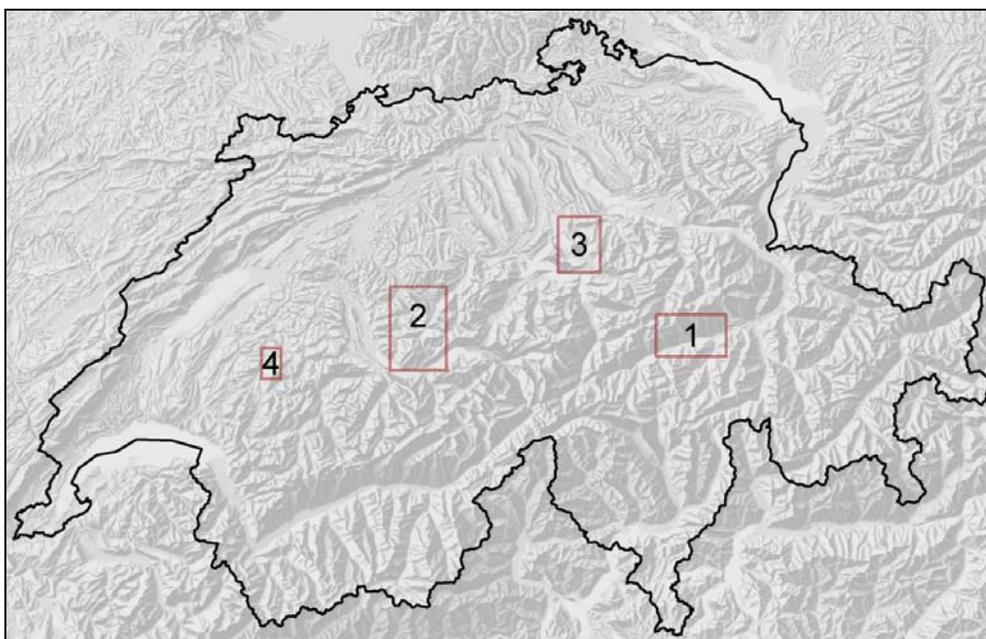


Figure 20: Emplacement des quatre secteurs-tests utilisés pour calibrer le modèle de calcul des coulées de boue.

N°	Nom	Région	Superficie [km ²]	Altitude [m]	Données disponibles	Evaluation qualitative des résultats
1	Surselva	Alpes (Verrucano)	375	650-3400	Carte indicative des dangers, cadastre des événements	Insuffisants (plutôt disposition)
2	Napf	Alpes et Préalpes (Helvétique, flysch, molasse)	600	550-2300	Carte indicative des dangers, cartes des dangers, cadastre des événements	Bons pour la disposition
3	Zoug	Préalpes (flysch, molasse)	300	410-1850	Carte indicative des dangers, cartes des dangers, cadastre des événements	Suffisants (comparables à la carte indicative des dangers)
4	Gruyère	Préalpes (flysch, molasse)	77	580-1720	Carte indicative des dangers, cartes des dangers, cadastre des événements	Suffisants à bons

Tableau 12: Caractéristiques des quatre secteurs-tests utilisés pour calibrer les paramètres. Le tableau comprend également une évaluation qualitative des spécialistes cantonaux.

5.6 Modélisation opérationnelle et qualité des résultats

Les zones d'arrachement et les trajectoires de transit et de dépôt ont été calculées automatiquement dans toutes les régions de la Suisse en appliquant la série de paramètres définie dans les secteurs-tests.

Les coulées de boue ont été enregistrées sous la forme de trajectoires, comme les chutes de pierres et de blocs. En tout, 47,6 millions de trajectoires ont été calculées en raison de la grande taille cumulée des zones d'arrachement. Le champ d'action des coulées de boue correspond aux trajectoires assorties de zones tampons. Elles ont été interprétées dans le module INTERSECT, comme les chutes de pierres et des blocs.

Qualité des résultats

La figure 21 présente les trajectoires des coulées de boue dans un secteur riverain du lac de Thoune. L'ensemble des trajectoires délimite le périmètre potentiellement exposé à ce processus.

Les mécanismes de déclenchement des glissements spontanés et des coulées de boue sont complexes et les facteurs déterminants sont très variables dans l'espace: la constitution et l'épaisseur des terrains meubles peuvent notamment différer considérablement dans un périmètre restreint. Leur cohésion varie aussi beaucoup dans le temps.

Les données de base homogènes à l'échelle de toute la Suisse, très générales, reflètent insuffisamment cette variabilité.

La modélisation sous SilvaProtect-CH a donc dû appliquer des paramètres standard, peu différenciés dans l'espace. C'est pourquoi les trajectoires modélisées ne peuvent pas restituer des situations géologiques, hydrologiques ou topographiques (MNT) à petite échelle.

Les ouvrages de protection n'ont pas été pris en compte dans la modélisation – hormis les grands remblais, tels que digues de protection, murs de soutènement et ouvrages similaires, qui ressortent dans le MNT25 ou le MNT10.

La modélisation des coulées de boue fournit généralement une image très pessimiste lorsque les conditions sont défavorables. Celles qui se produisent réellement ne touchent qu'une petite partie de la surface virtuellement atteinte. De plus, la zone de dépôt des coulées de boue et surtout des glissements spontanés de terrain meuble est souvent plus courte dans la réalité que dans la simulation.

Les résultats obtenus ne sont donc utilisables qu'au niveau d'une carte indicative des dangers générale, ce qui correspond à une échelle du 1:50 000. Ils ne sont pas appropriés pour travailler à une échelle plus fine.

6 Lave torrentielle

6.1 Bases de la modélisation du processus « lave torrentielle »

Voir le chapitre 5.1.

6.2 Description du processus

Les laves torrentielles sont des mélanges d'eau et de matériaux solides, comprenant une proportion élevée de matériaux solides (env. 30-60 %), qui s'écoulent à une vitesse lente à rapide. Naissant dans le lit d'un torrent ou dans un éboulis raide, elles descendent souvent en plusieurs coulées. Elles représentent un grand danger pour les localités.

Pour qu'une lave torrentielle se déclenche, il faut un minimum de matériaux mobilisables ainsi qu'une déclivité et un écoulement suffisants. La forêt atténue les processus de pente déterminants pour la production et l'apport de matériaux solides (glissements de terrain et érosion superficielle), diminuant ainsi le charriage potentiel. Cet effet protecteur réduit l'ampleur et la portée des laves torrentielles.

En règle générale, les processus de pente déterminants pour le charriage qui se produisent dans le bassin versant des torrents n'atteignent pas eux-mêmes les objets exposés, si bien qu'ils ne causent aucun dommage direct. Ils menacent les localités indirectement, par l'intermédiaire des laves torrentielles qui atteignent les cônes de déjection sur lesquels elles sont implantées. Il faut donc tenir compte du champ d'action des laves torrentielles pour différencier les processus de pente en fonction de leur incidence sur les dommages, et pour délimiter ensuite la forêt protectrice de manière pertinente.

Etapes du traitement des données

1. Préparation des données de base (géologie, relief)



2. Délimitation des surfaces déterminantes pour le charriage et des zones d'arrachement de laves torrentielles: modèle **MGSIM**



3. Modélisation des zones de transit et de dépôt des laves torrentielles: modèle **MGSIM/dfwalk**

6.3 Description de la modélisation de l'arrachement

Les algorithmes appliqués pour délimiter les zones de débordement de laves torrentielles, développés par le bureau Geo7 AG dans le cadre du projet FLAM-NAGEF et du projet PNR31 « Laves torrentielles et SIG », ont été utilisés à plusieurs reprises (cartes indicatives des dangers dans les cantons de Berne, Soleure, Lucerne, Argovie et Zoug). Les calculs ont été réalisés par des programmes écrits en langage C, tandis que les données d'entrée et de sortie, gérées dans un environnement SIG, avaient un format standard d'exportation sous ArcInfo.

Les périmètres menacés par des laves torrentielles ont été modélisés avec le programme MGSIM, qui comprend quatre modules:

- analyse du relief;
- estimation du charriage potentiel et analyse de l'apport en charriage;
- détermination des zones de décrochement de laves torrentielles;
- détermination de la portée des laves torrentielles et de leur propagation sur les cônes de déjection.

Analyse du relief

Les paramètres de relief déterminants pour le départ et la propagation des laves torrentielles ont été calculés à partir du modèle numérique de terrain. Le périmètre étudié a d'abord été subdivisé en sous-bassins versants, puis le réseau de chenaux et de ravines a été corrigé et affiné. Différents paramètres de relief ont ensuite été calculés sur tout le périmètre:

- taille du bassin versant pour chaque pixel;
- déclivité et exposition de la pente;
- calcul du cheminement des laves torrentielles (coulées uniques ou multiples).

Ces paramètres sont entrés comme données de base dans la modélisation proprement dite.

Estimation du charriage potentiel et analyse de l'apport en charriage

Les matériaux charriables qui se trouvent dans le bassin versant, ou plus précisément dans les chenaux, jouent un rôle essentiel dans le départ des laves torrentielles. Leur importance a été évaluée en fonction de la géologie, de la lithologie et du relief (berges, longueur et déclivité de la pente). Les données géologiques ont été préparées comme décrit dans le paragraphe du chapitre 5.1 (Traitement de la carte géotechnique de la CGS) pour l'évaluation du charriage potentiel. Les différentes lithologies ont été regroupées en fonction des critères mentionnés ci-après. Les seize unités géologiques qui en résultent sont énumérés dans l'annexe 10.1 (classes de la carte géotechnique de la Suisse CSG). La classification géologique s'est basée sur les critères suivants:

- production d'éboulis: faible, moyenne, forte;
- matrice des terrains meubles: argile-limon, sable-gravier, gravier-blocs;
- perméabilité du sous-sol: faible, moyenne, élevée.

Le charriage potentiel a été estimé au moyen d'un modèle de l'apport en charriage, en considérant les secteurs susceptibles d'alimenter une ravine ou un cours d'eau par un processus de chute, de glissement ou de lessivage (secteurs d'alimentation en matériaux charriables). Pour cela, il est important de connaître la nature du sous-sol proche de la surface.

Les secteurs voisins de chenaux, qui les alimentent en matériel par érosion des berges, glissement superficiel ou lessivage, ont été délimités en fonction de la déclivité de la pente. Puis on a étudié, dans les chenaux et les ravines, si la déclivité de la cellule contiguë dépassait le seuil prédéfini. L'opération a été répétée jusqu'à ce que la déclivité passe au-dessous du seuil ou que la distance maximale prédéfinie soit dépassée. La valeur de la déclivité de la pente dépend des conditions géologiques en surface.

Pour évaluer l'apport en charriage, il est important de connaître l'emplacement des zones en glissement. On a donc introduit comme donnée le champ d'action des coulées de boue. Les glissements de terrain ont été considérés comme déterminants pour le charriage, s'ils se dirigent vers le chenal et sont distants de 250 m au maximum.

L'origine des chutes de pierres susceptibles d'alimenter le charriage a été délimitée en appliquant simplement la méthode de la pente forfaitaire. Les zones rocheuses de déclivité supérieure à 34° pour lesquelles la pente forfaitaire jusqu'au chenal voisin ou à la ravine voisine dépasse 32° ont été considérées comme déterminantes pour le charriage. La distance maximale jusqu'à laquelle l'apport en charriage peut être significatif a été fixée à 1000 m.

L'érosion éventuelle du chenal lui-même a été évaluée en plus de l'apport superficiel en matériaux charriables. On a supposé qu'une érosion sensible a lieu lorsque le chenal a une déclivité supérieure à 6° et qu'il traverse des terrains meubles (d'après le modèle Vector25).

Les surfaces renfermant des matériaux charriables ont été pondérées pour différencier l'importance de l'apport en charriage. Les facteurs de pondération sont le type de source de matériaux (pente instable, berge, lieu de départ de chutes de pierres) et les caractéristiques géologiques (composition des matériaux, production d'éboulis). La pondération des chenaux a tenu compte de leurs caractéristiques propres. On en a distingué quatre types: chenal dans une pente instable, dans un éboulis ouvert, dans le rocher et autre type. Leurs valeurs respectives ont été cumulées le long de l'écoulement identifié par le modèle numérique de terrain pour obtenir la surface pondérée déterminante pour le charriage.

A la fin des calculs, chaque pixel tombant sur un chenal était assorti d'une valeur de charriage prête à entrer dans la modélisation de la propagation des laves torrentielles empruntant ce chenal.

Détermination de la zone d'arrachement de laves torrentielles

L'occurrence d'une lave torrentielle dépend essentiellement de la présence de matériaux charriables et de la stabilité des terrains meubles. Dans la plupart des cas, leur déclenchement est lié aux conditions hydrologiques. On distingue plusieurs mécanismes ou types d'arrachement:

Arrachement de type 1: dans une pente raide comportant un terrain meuble peu consolidé (moraine ou remplissage de vallée glaciaire). La rupture est due à la saturation du terrain meuble, qui se met alors à glisser.

Arrachement de type 2: au passage entre une paroi rocheuse et un éboulis. L'eau est concentrée dans la paroi, puis elle atteint l'éboulis, où elle peut déstabiliser le terrain ou le fond d'un torrent.

Arrachement de type 3: entre des rochers et dans un couloir rempli de matériel morainique.

Arrachement de type 4: dans un tronçon de chenal raide.

Pour la modélisation des laves torrentielles dans SilvaProtect-CH, les types d'arrachement 3 et 4 ont été retenus et correspondent aux lieux de départ potentiels. Les zones d'arrachement situées dans des pentes (types 1 et 2) ont été considérées comme lieux de départ de coulées de boue.

Zone d'arrachement	Conditions
Type 3	<ul style="list-style-type: none">- Présence d'un minimum de matériaux mobilisables- Taille du bassin versant d'une taille supérieure ou égale à 0,5 ha- Pente limite pour le déclenchement d'une lave torrentielle est atteinte
Type 4	<ul style="list-style-type: none">- Présence d'un minimum de matériaux mobilisables- Taille du bassin versant d'une taille supérieure ou égale à 0,5 ha- Pente limite pour le déclenchement d'une lave torrentielle est atteinte

Tableau 13: Vue d'ensemble des types de zones d'arrachement de laves torrentielles.

Lorsque la zone d'arrachement se trouve dans un chenal, sa déclivité est en rapport avec la taille du bassin versant situé à l'amont. La mobilisation des matériaux charriables dépend de la stabilité des matériaux meubles qui se trouvent dans le chenal et de la force tractrice de l'eau. Plus la pente d'un dépôt meuble est proche de la pente limite, plus une force tractrice faible suffit pour le mettre en mouvement. L'équation suivante décrit la pente limite des zones d'arrachement de laves torrentielles situées dans un chenal (Zimmermann & al., 1997, figure 22):

$$J = 0,32 * EG^{-0.2} \quad J = \text{pente limite pour le déclenchement d'une lave torrentielle}$$
$$EG = \text{taille du bassin versant en km}^2$$

La formule indique que plus le bassin versant situé à l'amont d'un tronçon de chenal est petit, plus ce tronçon doit être raide pour qu'une lave torrentielle puisse y naître.

Des tronçons de départ de laves torrentielles ont aussi été délimités là où des glissements de terrain sont susceptibles de boucher le chenal et là où le bassin versant situé à l'amont a une superficie d'au moins 5 ha.

Lorsque les conditions de départ d'une lave torrentielle n'étaient pas remplies, on a supposé qu'il pouvait y avoir des crues charriant des matériaux. Mais ce processus n'a pas été modélisé dans le cadre de SilvaProtect-CH.

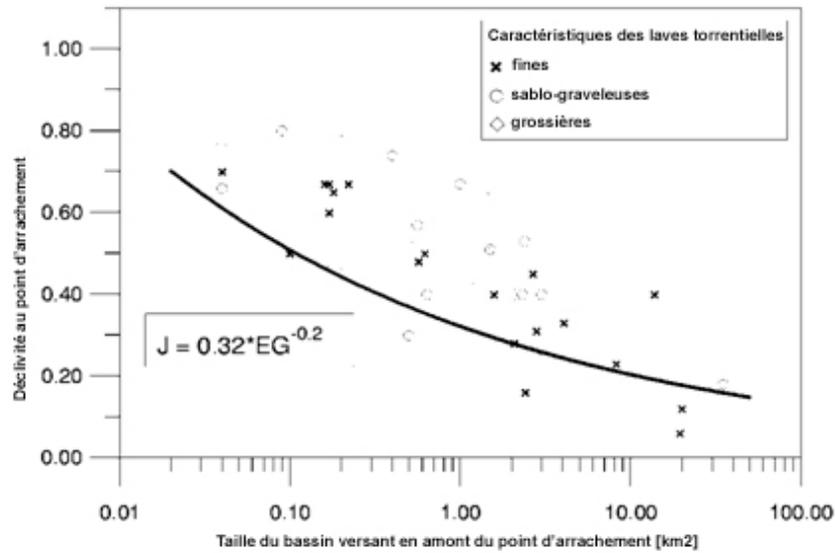


Figure 22: Conditions de départ d'une lave torrentielle dans un chenal {J = pente limite de déclenchement [-], EG = taille du bassin versant [km²], (Zimmermann et al., 1997)}.

6.4 Description de la modélisation de la portée et de la propagation sur le cône de déjection

Détermination de la portée des laves torrentielles

La portée des laves torrentielles a été estimée avec un modèle à deux paramètres basé sur le modèle d'avalanche de Voellmy (Perla et al., 1980).

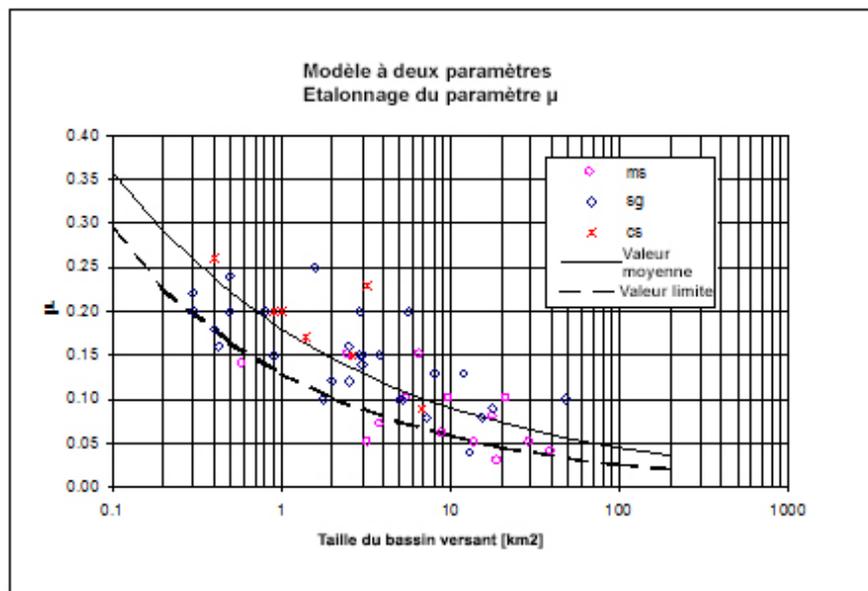


Figure 23: Coefficient de frottement par glissement μ pour les petites et grandes laves torrentielles, en fonction de la taille du bassin versant (ms: matrix supported = grande proportion de particules fines, sg: sand-gravel = grande proportion de sable, cs: clast supported = grande proportion de sable et de gravier).

Le modèle calcule la vitesse des laves torrentielles tronçon par tronçon le long de leur trajectoire. En plus de la pente moyenne de chaque segment, il se base sur deux paramètres de frottement: un coefficient de frottement par glissement μ et un coefficient de frottement interne M/D (« mass to drag ratio », selon Perla et al., 1980). Le coefficient de frottement par glissement dépend de la taille du bassin versant (débit). Plus il y a d'eau à disposition, plus la lave torrentielle est liquide et plus elle se propage loin. La figure 23 illustre deux fonctions: celle qui concerne la valeur moyenne s'applique aux petites laves torrentielles (surface déterminante pour le charriage pondérée < 5 ha) et celle qui porte sur la valeur limite s'applique aux grandes.

Elément du modèle: détermination de la propagation des laves torrentielles

La propagation des laves torrentielles a été simulée au moyen d'une approche de type parcours aléatoire, dans laquelle la cellule de la grille succédant à une autre est choisie au hasard. La probabilité qu'une cellule soit sélectionnée pour poursuivre la propagation dépend de la déclivité de la pente et de la direction suivie jusqu'ici par le processus (persistance). Les « successeurs » possibles d'une cellule sont choisis en appliquant une méthode multidirectionnelle développée dans le cadre du projet FLAM-NAGEF (Heinimann et al., 1998). Cette méthode tient compte de la pente limite à partir de laquelle une lave torrentielle peut se propager et de la déclivité vers les cellules voisines. Les « successeurs » possibles sont ainsi choisis en comparant la déclivité maximale en direction d'une cellule voisine avec la déclivité en direction de toutes les autres cellules voisines.

Exécution de la simulation avec le programme dfwalk écrit en langage C

Les laves torrentielles ont été simulées avec le programme dfwalk (Gamma, 2000), qui regroupe les modèles de portée et de propagation. La simulation comprenait les trois étapes principales suivantes:

- La première a consisté à établir les cheminements possibles des écoulements sans tenir compte de leur portée. Pour ce faire, on a déterminé un cheminement possible à partir d'un pixel de départ (« pixel d'arrachement »), en appliquant la méthode de la pente forfaitaire et l'approche de type parcours aléatoire, puis on l'a enregistré dans une couche au format raster. Ses paramètres – Δh , Δl et la taille du bassin versant – ont été consignés dans un tableau. On a choisi une valeur très basse à la pente forfaitaire pour s'assurer de disposer de toutes les valeurs nécessaires pour simuler ensuite la portée.
- Dans la deuxième étape, la portée des laves torrentielles a été simulée à l'aide du modèle à deux paramètres, en utilisant le tableau des paramètres de cheminement.
- Dans la troisième étape, la portée calculée a été reportée sur le cheminement déterminé à la première étape. On a obtenu ainsi la trajectoire de chaque lave torrentielle.

Chaque pixel de départ a été soumis cent fois à ce traitement. Le modèle dfwalk a fourni différents parcours de dépôt possibles, considérés comme des trajectoires distinctes, dans la zone de propagation. L'ensemble des trajectoires délimite les périmètres potentiellement exposés à ce processus.

6.5 Calibrage des paramètres du modèle

Dans le cadre de différents projets et depuis de nombreuses années, le groupement de bureaux mandaté a mis en œuvre les modèles décrits. Il s'agissait essentiellement d'élaborer des cartes indicatives cantonales des dangers à l'échelle 1:25 000. Le modèle de lave torrentielle MGSIM est appliqué depuis longtemps pour établir des cartes indicatives de dangers et des cartes des dangers en Suisse et à l'étranger (Tyrol du Sud).

Bien que le modèle utilisé ait fait ses preuves sur ces sites, on a opté pour une démarche en deux temps dans le cadre de SilvaProtect-CH: le modèle a d'abord été appliqué dans un secteur-test (figure 24). Puis ses paramètres ont été fixés sur la base des résultats obtenus et toute la Suisse a ainsi été modélisée.

Cette démarche en deux temps semble appropriée pour vérifier l'éventuelle dégradation de la qualité lorsqu'on passe à l'échelle du pays, due à la simplification des paramètres du modèle (géologie à grande échelle) et à la baisse de densité spatiale des résultats (nécessitée par l'application).

Les résultats obtenus dans le secteur-test ont été évalués qualitativement par les spécialistes cantonaux. Après les avoir comparés visuellement avec les informations disponibles (cartes indicatives des dangers, cadastres des événements, etc.), ils ont qualifiés ces résultats de « bons », « suffisants » ou « insuffisants », en vue de la simulation à l'échelle nationale (tableau 14).

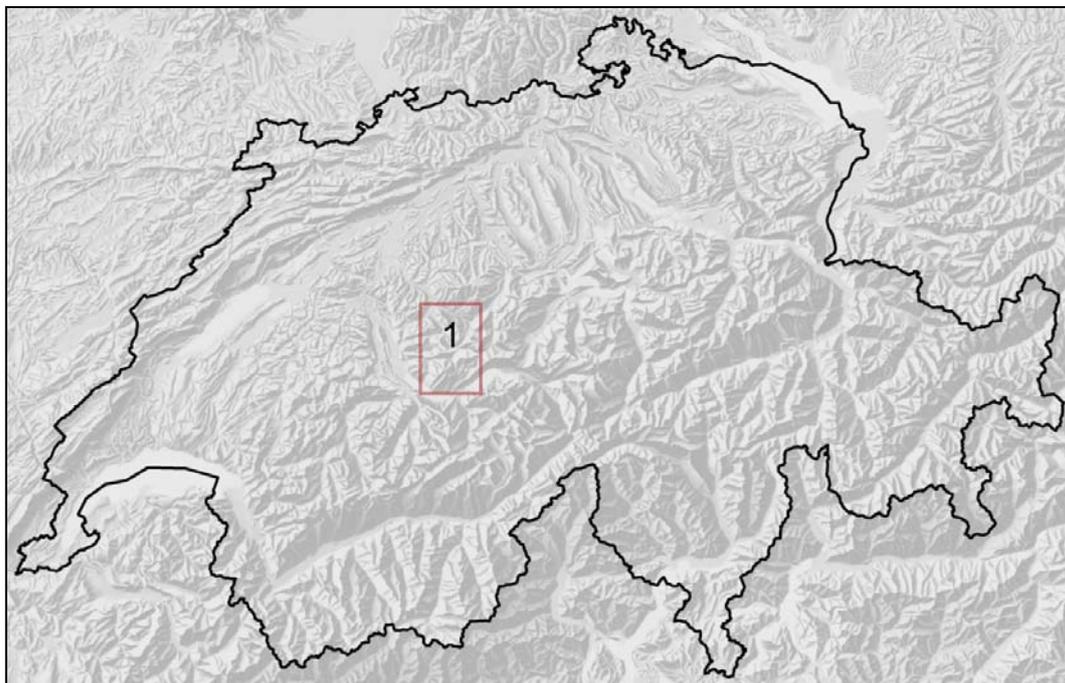


Figure 24: Emplacement du secteur-test utilisé pour calibrer le modèle de calcul des laves torrentielles.

N°	Nom	Région	Superficie [km ²]	Altitude [m]	Données disponibles	Evaluation qualitative des résultats
1	Napf	Alpes et Préalpes (Helvétique, flysch, molasse)	600	550-2300	Carte indicative des dangers, cartes des dangers, cadastre des événements	Bons

Tableau 14: Caractéristiques du secteur-test utilisé pour calibrer les paramètres. Le tableau comprend également une évaluation quantitative des spécialistes cantonaux.

6.6 Modélisation opérationnelle et qualité des résultats

Les surfaces déterminantes pour le charriage et les trajectoires des laves torrentielles ont été calculées automatiquement dans toute la Suisse en appliquant les paramètres définies dans le secteur-test.

Lave torrentielle – surface déterminante pour le charriage

Quelque 6,7 millions de trajectoires ont été calculées pour traiter ce processus. Chacune d'entre elles décrit une lave torrentielle depuis son lieu de départ jusqu'au point le plus externe de son dépôt.

Comme les secteurs déterminant pour le charriage sont essentiels pour la délimitation des forêts de protection contre les laves torrentielles, ils ont aussi été mis en forme comme produit final. Ces secteurs, à la base de la modélisation des laves torrentielles, correspondent aux périmètres qui fournissent les matériaux mobilisables déterminants.

La localisation de la trajectoire des laves torrentielles offre la possibilité d'appréhender le réseau de ravines et de tronçons de chenaux à partir du point de départ des coulées. L'analyse de ce réseau permet de relier les surfaces déterminantes pour le charriage et les trajectoires des laves torrentielles. C'est pourquoi le traitement du processus « lave torrentielle » dans les modules INTERSECT et SYNTHÈSE a considéré ce réseau en plus des bassins versants, des surfaces susceptibles d'alimenter le charriage et des trajectoires des laves torrentielles.

Ravine – tronçon de chenal

Chaque ravine et tronçon de chenal peut être utilisé simplement et rapidement pour effectuer des recherches en amont et en aval. Leurs attributs géométriques sont complétés par leur dénivellation et par un paramètre décrivant le charriage.

Bassin versant

Tous les bassins versants calculés ont été utilisés, conjointement avec les ravines, pour associer les surfaces susceptibles d'alimenter le charriage et les trajectoires des laves torrentielles.

7 Epandage d'alluvions

7.1 Vue d'ensemble des bases utilisées

MNT25/10: Le MNT25/10 est un modèle numérique de terrain qui a été adapté, amélioré, pour répondre aux exigences de la simulation des processus dangereux. Une grille de résolution égale à dix mètres, permettant de travailler à l'échelle 1:25 000, a été établie pour toute la Suisse à partir du modèle de base et du modèle matriciel MNT25 (Swisstopo). Différentes variables dérivées (déclivité et exposition de la pente, déclivité du chenal, réseau de ravines) nécessaires pour modéliser les processus sont tirées du MNT.

Carte géotechnique de la Suisse au format numérique: Cette carte a servi de base pour caractériser les unités lithologiques, les classer et les doter d'attributs en fonction de leur altérabilité et de leur stabilité. Le charriage potentiel a été évalué au moyen de l'attribut « production d'éboulis » dans la modélisation de l'épandage d'alluvions.

Surfaces primaires du modèle Vector25: La modélisation de l'épandage d'alluvions a besoin de données sur la production de matériaux charriables, qui ont été obtenus à l'aide des surfaces primaires. Les catégories suivantes ont été considérées: rocher, éboulis, lacs, glaciers et éboulis sur glaciers. La délimitation des lieux de rupture générant des épandages d'alluvions a aussi exploité des informations concernant les barrages et les digues de retenue.

Réseau hydrographique du modèle Vector25: Ce réseau a servi de base pour simuler le processus « épandage d'alluvions ». La modélisation a exploité le réseau hydrographique structuré (état en 2007), qui numérote les cours d'eau d'une manière univoque, en distinguant les principaux et les secondaires. Il a été utilisé pour distinguer les bassins versants, établir le réseau de ravines et délimiter les lieux de rupture. Les mises sous terre (lieux de rupture potentiels) ont aussi été définies sur la base du réseau hydrographique.

Réseau routier et ferroviaire du modèle Vector25: Ce réseau a été utilisé pour définir les lieux de rupture (voûtages). Les tunnels et les galeries n'ont pas été considérés.

Déclivité des cours d'eau: La modélisation des surfaces d'épandage a été limitée aux cours d'eau de déclivité supérieure à 3 %. La pente des cours d'eau a été calculée à partir du jeu de données vectorielles décrivant le réseau hydrographique. Sur chaque tronçon de cours d'eau, l'altitude du point de départ et du point d'arrivée a été déterminée, puis la dénivellation et la déclivité ont été calculées. Les tronçons de cours d'eau ainsi traités ont été répartis en trois classes de déclivité:

- Classe 1: déclivité < 2 %
- Classe 2: déclivité ≥ 2 % et < 3 %
- Classe 3: déclivité ≥ 3 %

Prise en compte des ouvrages de protection

En règle générale, comme dans le présent projet, les ouvrages de protection contre les crues ne sont pas considérés à l'échelon de la carte indicative des dangers. Seuls ceux qui ressortent dans le modèle de terrain, soit les grands remblais, tels que digues de protection, murs de soutènement et ouvrages similaires, ont été pris en compte ici.

Les ponts ne sont pas non plus entrés dans la modélisation comme ouvrages de protection, car les informations disponibles au sujet de leurs effets sur les différents processus dangereux sont accompagnés d'une trop grande incertitude.

Les champs d'action ainsi calculés signalent les secteurs susceptibles d'être atteints lorsque les conditions sont défavorables (carte indicative des dangers). Ils sont généralement un peu exagérés, mais cela garantit que les lieux de conflit possible (périmètres potentiellement à risque) soient identifiés.

Les autres ouvrages de protection sont considérés à l'échelon de la carte des dangers, qui requiert des indications détaillées sur leur fonctionnement et une évaluation de leur effet protecteur.

7.2 Description du processus

Les dangers liés aux crues englobent un large éventail de phénomènes agissant selon différents mécanismes. Dans les **cours d'eau raides** (torrents), outre les processus purement hydrauliques (inondations), ceux qui impliquent d'importants transports de matériaux solides sont les plus dangereux.

Sont considérées comme des cours d'eau raides (torrents) les eaux superficielles qui ont une forte pente sur certains tronçons au moins, acheminement des débits variant considérablement dans un bref laps de temps et charrient parfois d'importantes quantités de matériaux solides. Les phénomènes qui s'y produisent sont décrits par les sous-processus inondation, épandage d'alluvions, débordement de lave torrentielle et érosion des berges. Il arrive fréquemment que des processus connexes, comme le charriage de bois flottant ou le dépôt de matériaux charriés, y jouent un rôle essentiel.

Un débordement de lave torrentielle ou un épandage d'alluvions survient lorsque des matériaux solides (charriés) sont déposés hors du cours d'eau par une lave torrentielle ou par un fort écoulement d'eau (« charriage fluvial »). Cela se produit généralement dans le secteur du cône de déjection. Les plus grands dommages sont imputables à la poussée au front des laves torrentielles, accentuée par les blocs qu'elles charrient, et aux épais dépôts de galets et d'alluvions.

Etapes du traitement des données

1. Reprise des données de base (paramètres de relief, charriage) du projet principal SilvaProtect-CH
↓
2. Délimitation des lieux de rupture donnant lieu à des épandages d'alluvions:
modèle **WGSIM**
↓
3. Modélisation de la portée et de la propagation des épandages d'alluvions:
modèle **WGSIM**
↓
4. Traitement des surfaces sujettes à l'épandage d'alluvions:
modèle **WGSIM**

7.3 Description de la modélisation de la rupture

La méthode appliquée pour modéliser l'épandage d'alluvions implique de situer les périmètres menacés par les processus liés aux cours d'eau. L'accent a été mis sur la délimitation spatiale du champ d'action de ces processus.

Les surfaces sujettes à un processus ont été délimitées pour les cours d'eau de déclivité supérieure à 3 %. Lorsque la pente est inférieure 3 %, la résolution du modèle numérique de terrain ne permet plus de simuler les surfaces menacées par un épandage d'alluvions de manière fiable. La modélisation de ce processus a donc été limitée aux cours d'eau raides de déclivité supérieure à 3 %. Le seuil a été abaissé à 2 % le cas échéant pour constituer une zone de transition vers un plan d'eau.

Détermination des lieux de rupture

La détermination des lieux de rupture potentiels joue un rôle essentiel dans la modélisation de l'épandage d'alluvions. Une rupture peut notamment se produire là où un cours d'eau se rétrécit, au risque de provoquer un débordement d'eau et de matériaux solides en cas de crue. Les emplacements sensibles sont les suivants:

- début d'un tronçon situé sous terre;
- passage sous un voûtage ou un pont;
- rétrécissement du cours d'eau avec diminution de la capacité d'écoulement.

Les lieux de rupture potentiels ont été détectés automatiquement à partir des réseaux hydrographique, routier et ferroviaire du modèle Vector25, puis les emplacements critiques ont été vérifiés avec le modèle numérique de terrain et la carte pixel CP25. Des lieux de rupture n'ont été délimités pour modéliser l'épandage d'alluvions seulement si un cours d'eau superficiel de déclivité supérieure à 3 % figurait dans le modèle Vector25.

Dans la simulation qui a suivi, les surfaces de propagation ont été calculées selon une méthode itérative à partir des lieux de rupture déterminés et affinés précédemment. La procédure a été lancée à chaque point de rupture, sans tenir compte des débordements d'eau et de matériaux solides qui se seraient éventuellement produits à l'amont.

Détermination des lieux de rupture au début de tronçons souterrains

Les tronçons de cours d'eau mis sous terre ont souvent une section insuffisante, ce qui risque de provoquer un remous d'exhaussement ou une obstruction de l'écoulement, surtout lorsqu'une crue entraîne du bois flottant. Les passages entre un tronçon aérien et un tronçon souterrain (introduction dans des tuyaux) ont été considérés comme des points faibles (lieux de rupture) potentiels.

Le modèle a aussi désigné des lieux de rupture en lien avec des barrages et des digues de retenue (passage d'un axe de lac – axe d'un cours d'eau fictif traversant un lac – à un tronçon de cours d'eau souterrain). Mais comme les cours d'eau concernés sont régulés, ces emplacements n'ont pas été considérés comme des lieux de rupture dans le modèle.

Détermination des lieux de rupture au passage sous un voûtage ou un pont

La capacité d'écoulement est souvent réduite au passage des voûtages et des ponts. Des lieux de rupture potentiels ont été déterminés aux intersections entre un cours d'eau et le réseau routier ou ferroviaire. Puis la pertinence de ces emplacements a été vérifiée. Les passages sous les grands ponts, de portée supérieure à 40 m, ont été retirés de la liste des points de rupture.

Détermination des lieux de rupture dus au relief

Les brusques variations de la configuration d'un cours d'eau génèrent aussi souvent des points faibles. Pour déterminer les lieux de rupture déterminants, on a examiné, pour chaque pixel tombant sur un cours d'eau, si l'écoulement peut emprunter plusieurs cheminements (multiple flowdirection) dans la direction calculée. Si c'est le cas sur un certain tronçon, le pixel ou le segment concerné a été considéré comme un lieu de rupture dû au relief. La longueur de ces emplacements a été limitée à cinq cellules consécutives de la grille dans cette modélisation.

Lieux de rupture non pris en compte

La détermination des lieux de rupture à partir d'un SIG fournit tous les points faibles satisfaisant aux critères du modèle. Mais il arrive que certains d'entre eux soient situés dans un endroit peu plausible. C'est pourquoi leur pertinence a été vérifiée dans un deuxième temps.

Les lieux de rupture correspondant à un grand lac (de superficie supérieure à 100 000 m²), à un glacier, à un barrage ou à un lac de retenue n'ont pas été appliqués dans la modélisation.

7.4 Estimation du charriage potentiel

En région de collines et de montagnes, les matériaux susceptibles d'être charriés se trouvant dans un bassin versant ou dans un chenal jouent un rôle essentiel. Ils sont impliqués, outre l'inondation, dans l'épandage d'alluvions (dépôt de matériaux solides sur le cône de déjection d'un torrent ou d'une petite rivière) et dans les laves torrentielles. Leur importance est évaluée en fonction de la géologie, de la lithologie et du relief (berges, pentes). L'incidence des matériaux charriables dans un bassin versant est classée sommairement en appliquant des seuils simples.

Les surfaces déterminantes pour le charriage ont été délimitées dans le cadre du projet SilvaProtect-CH (lave torrentielle), puis reprises dans la modélisation présente.

Les surfaces renfermant des matériaux mobilisables ont été pondérées pour différencier l'importance de l'apport en charriage. Les facteurs de pondération étaient le type de source de matériaux (pente instable, berge, lieu de départ de chutes de pierres) et la géologie locale (altérabilité).

La pondération des cours d'eau a tenu compte de leurs caractéristiques propres. On en a distingué trois types: cours d'eau dans une pente instable, dans le rocher et autre. Leurs poids respectifs ont été cumulés le long de l'écoulement identifié par le modèle numérique de terrain pour obtenir la surface pondérée déterminante pour le charriage. La sommation n'a été interrompue que lorsque le chenal se jetait dans un lac.

A la fin des calculs, chaque pixel tombant sur un cours d'eau était assorti d'une valeur de charriage pouvant être introduite dans la modélisation de la propagation des épandages d'alluvions.

Propagation des matériaux charriés

Les surfaces d'épandage ont été délimitées de la même manière que les surfaces inondables. C'est la présence de matériaux mobilisables, exprimée par une valeur de charriage, qui a été appliquée comme critère général pour déterminer l'occurrence d'un épandage d'alluvions dans un cours d'eau donné.

Les surfaces menacées par un épandage d'alluvions ont été obtenues à partir des lieux de rupture définis au préalable. Leur extension a été générée selon une méthode multidirectionnelle (multiple flowdirection, MFD), en tenant compte de la déclivité.

7.5 Critères d'occurrence d'un épandage d'alluvions

Un épandage d'alluvions ne peut se produire en un lieu de rupture potentiel que si certains critères spécifiques à ce processus sont satisfaits. Ils ont été fixés comme suit:

Critère	Seuil
Taille minimale du bassin versant	0,1 km ²
Déclivité minimale du cours d'eau	2 %
Charriage potentiel minimal	5

Tableau 15: Critères d'occurrence d'un épandage d'alluvions.

Taille minimale du bassin versant: Cette valeur auxiliaire exprime le volume d'eau éventuellement présent en cas de crue. On a admis que le bassin versant devait avoir une taille minimale pour que les précipitations tombant dans le cours d'eau soit suffisantes pour pouvoir mobiliser des matériaux charriables. Le choix des valeurs limites retenues se base sur des valeurs d'expérience.

Déclivité minimale du cours d'eau: Ce critère a été appliqué pour limiter la simulation aux cours d'eau raides (> 3 %). Le seuil de déclivité a été abaissé à 2 % le cas échéant pour constituer une zone de transition vers un plan d'eau. La déclivité du cours d'eau correspond à la déclivité moyenne du tronçon considéré.

Surface minimale déterminante pour le charriage: La limitation du charriage potentiel à une valeur de 5 empêche de délimiter des surfaces d'épandage trop restreintes, qui ne peuvent plus être représentées de manière réaliste à l'échelon de la carte indicative des dangers. Le choix des valeurs retenues se base sur des valeurs d'expérience.

Critères de propagation des épandages d'alluvions

La propagation des matériaux charriés dépend de la topographie (déclivité de la pente) et de la quantité de matériaux solides disponibles. Elle s'arrête dès qu'un des deux facteurs n'est plus satisfait.

La propagation a été arrêtée lorsqu'au moins un des critères suivants était satisfait:

- la déclivité devient inférieure à 2 % (dépôt des matériaux charriés);
- la distance de propagation maximale (calculée en fonction de la taille du bassin versant et de la quantité de matériaux charriables) est atteinte;
- le cours d'eau considéré en atteint un autre dont le bassin versant a une superficie au moins double.

7.6 Paramètres appliqués pour simuler l'épandage d'alluvions

L'épandage d'alluvions a été simulé en appliquant les paramètres suivants:

Paramètres	Alpes	Plateau
Pente limite d'amorçage de la propagation	14°	14°
Coefficient de propagation	3	1,5
Distance de recherche	10 m	10 m
Déclivité de l'épandage d'alluvions	0,02	0,02
Constante d'épandage	10	10

Tableau 16: Paramètres appliqués pour simuler l'épandage d'alluvions.

Le charriage potentiel a été classé pour simuler l'épandage d'alluvions:

Intervalles de valeurs du charriage potentiel	Classe
> 2 et ≤ 10	1
> 10 et ≤ 100	2
> 100	3

Tableau 17: Classification du charriage potentiel.

7.7 Justification du choix des paramètres

Des tests de simulation, basés sur les enseignements tirés dans la région pilote, ont été pratiqués dans la région « Aare_Alpin ». Elle a été choisie en raison de l'existence de cartes des dangers et la carte indicatives des dangers. La correspondance avec ces cartes a joué un rôle décisif dans le choix des paramètres. Comme ce projet vise à élaborer une carte indicative, l'idée était de délimiter les impacts des processus plus largement que lors de l'établissement d'une carte des dangers. Mais ce but n'a pas pu être atteint à chaque fois, car le modèle de terrain disponible (résolution 10 m) ne restitue pas toujours de manière précise la surface réelle du sol.

La valeur des paramètres a aussi été choisie en fonction de l'évolution des processus. On s'est efforcé d'assurer une transition fluide (processus en cascade) entre la lave torrentielle, l'épandage d'alluvions et l'inondation (figure 26).

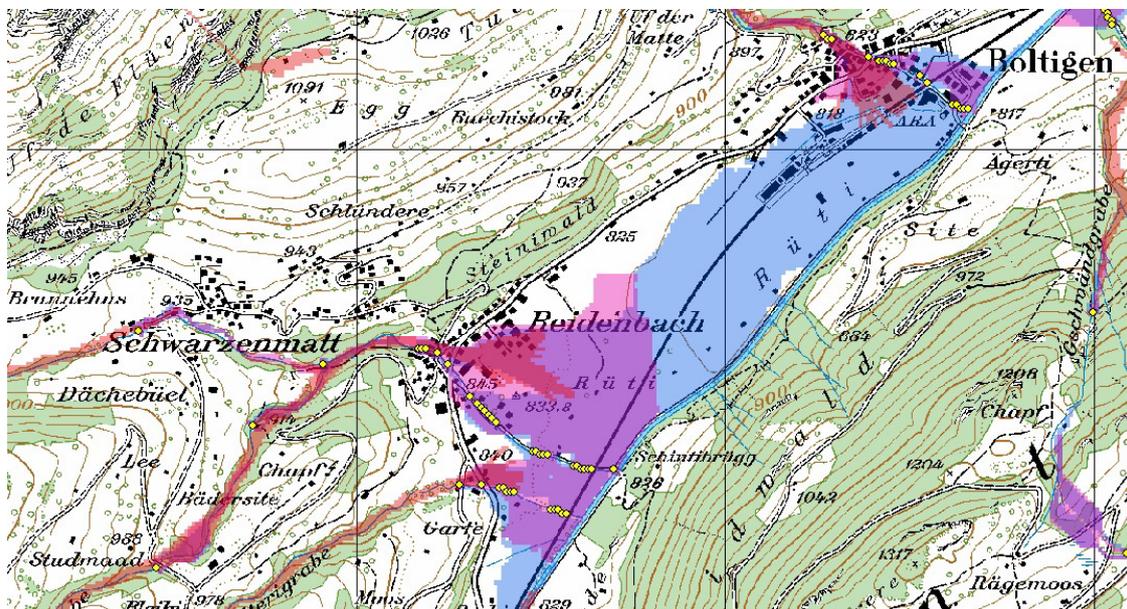


Figure 26: Représentation des processus lave torrentielle, épandage d'alluvions et inondation dans la région « Aare_Alpin ». Lave torrentielle = rouge, épandage d'alluvions = violet, inondation = bleu clair. Les points jaunes indiquent les lieux de rupture.

Pente limite

La valeur de la pente limite appliquée dans tous les secteurs examinés pour tester la simulation de l'épandage d'alluvions a été fixée suite à des essais la faisant varier entre 12° et 16°. Ici également, les meilleurs résultats ont été obtenus avec un seuil de 14°. La propagation des épandages modélisés commençait souvent trop tard lorsque la limite était fixée à 12° et les champs d'action étaient souvent trop vastes lorsqu'elle était posée à 16°.

Coefficient de propagation

Le coefficient de propagation régit l'extension latérale des surfaces sujettes aux épandages d'alluvions. Il a également été fixé suite à des essais de modélisation. Les résultats obtenus ont été comparés avec diverses cartes des dangers existantes.

Les régions de caractère essentiellement alpin et celles qui tiennent surtout du Plateau ont été distinguées dans la simulation de l'épandage d'alluvions. Comme la part de charriage tend à être surestimée sur le Plateau, l'application d'un coefficient de propagation inférieur donne une image plus réaliste des périmètres sujets à ce processus. Les résultats les plus pertinents ont été obtenus avec une valeur de 1,5. Dans les Alpes, les calculs ont appliqué un coefficient de propagation de 3.

7.8 Qualité de la modélisation de l'épandage d'alluvions

La figure 27 expose les surfaces sujettes aux épandages d'alluvions dans un secteur riverain du lac de Thoue. L'ensemble des surfaces détermine les périmètres potentiellement exposés aux épandages d'alluvions.

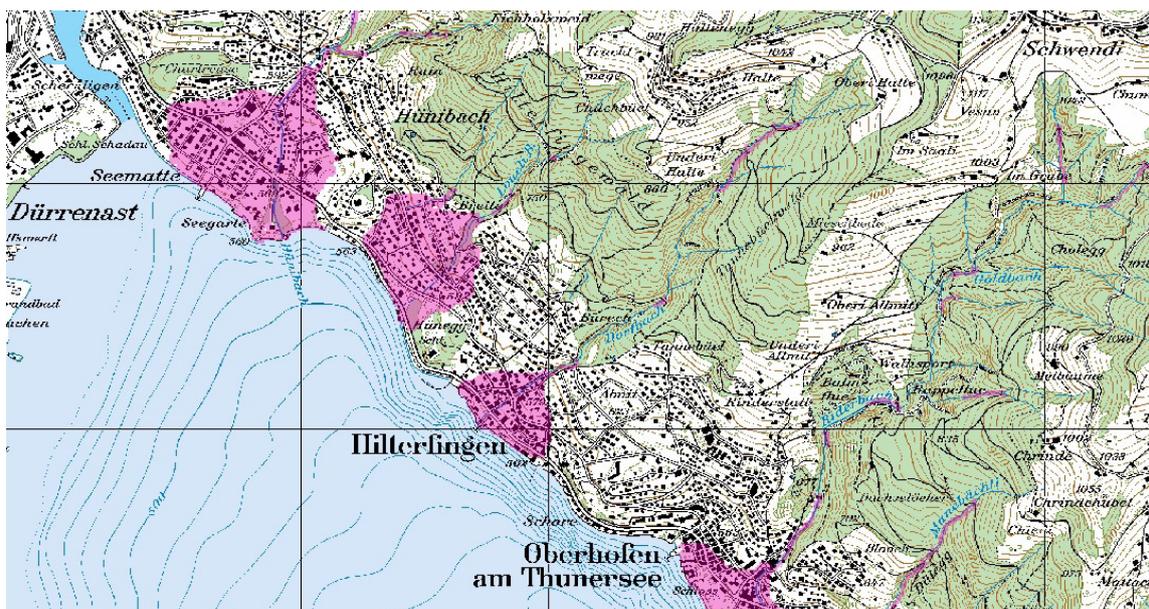


Figure 27: Périmètres sujets à l'épandage d'alluvions (magenta) dans la région « Aare_Alpin », à l'exemple de Hiltorfingen et d'Oberhofen.

Le danger dû à l'épandage d'alluvions n'a été simulé que pour les cours d'eau raides (> 3 %) du modèle Vector25, en appliquant des paramètres standard. C'est pourquoi les surfaces obtenues ne restituent pas toujours fidèlement les particularités locales. La résolution du modèle de terrain limite aussi les possibilités. Une maille de 10 x 10 m ne permet pas de rendre les petites irrégularités du sol, susceptibles d'influencer le processus. De plus, les ouvrages de protection n'ont pas été pris en compte dans la modélisation – hormis les grands remblais, tels que digues de protection, murs de soutènement et ouvrages similaires, qui ressortent dans le MNT25/10.

Les champs d'action calculés indiquent donc les secteurs susceptibles d'être atteints lorsque les conditions sont défavorables. Les résultats ainsi obtenus ne peuvent donc être utilisés qu'au niveau de la carte indicative des dangers, ce qui correspond à l'échelle du 1:25 000. Ils ne sont pas appropriés pour travailler à une échelle plus fine.

8 Processus liés aux cours d'eau

Au début, lors de la phase I du projet SilvaProtect-CH, la modélisation portait sur les laves torrentielles, sur les surfaces déterminantes pour le charriage et le bois flottant et sur les surfaces influençant l'hydrologie plutôt que sur les processus en lien avec les cours d'eau. Mais il s'est avéré durant la phase II que les résultats pâtissaient des lacunes affectant le réseau hydrologique appliqué et que la modélisation était insatisfaisante à cause, notamment, de divergences d'appréciation au sujet des processus à considérer. L'approche utilisée pour représenter les processus en lien avec les cours d'eau a donc été améliorée au cours de la phase II, puis appliquée à la phase I. La nouvelle méthode est décrite ci-après, tandis que l'ancienne est exposée dans le document SilvaProtect phase 1 (OFEV, 2008).

Les processus liés aux cours d'eau ont été modélisés en utilisant essentiellement les données disponibles dans le cadre de SilvaProtect-CH, soit le réseau hydrographique et les résultats de la simulation des processus « lave torrentielle et épandage d'alluvions », « avalanche », « coulée de boue et glissement de terrain » et « chute de pierres et de blocs ». Elles ont été complétées par des informations fournies par les cantons. La modélisation a suivi les trois étapes décrites ci-après.

8.1 Identification des processus déterminants

Les processus dans lesquels la forêt joue un rôle important (positif ou négatif, p. ex. en apportant du bois flottant) proche du cours d'eau ont été définis précisément dans un premier temps. La dénomination « processus en lien avec un chenal » englobe les phénomènes suivants :

- lave torrentielle / épandage d'alluvions;
- mobilisation de bois flottant / obstruction du lit;
- érosion / déstabilisation de la berge (due à un processus lié aux cours d'eau);
- coulée de boue / glissement de terrain dans un cours d'eau;
- chute / avalanche dans un cours d'eau.

La notion de « processus en lien avec un chenal » tient implicitement compte des *effets hydrologiques de la forêt* sur le chenal proprement dit, même si le phénomène de l'inondation n'est pas explicitement considéré dans les processus susmentionnés.

8.2 Identification des cours d'eau pertinents

Le réseau des cours d'eau pertinents s'est basé sur le réseau retenu originellement dans le projet SilvaProtect-CH et il a été finalisé en tenant compte des laves torrentielles et des épandages d'alluvions modélisés (chapitres 6 et 7). Un cours d'eau a été jugé pertinent lorsque les processus simulés liés à celui-ci touchaient un objet susceptible d'être endommagé (figure 28). Cette première approche a été réalisée automatiquement à l'aide du SIG. Puis les cours d'eau pertinents (en rouge)

ont été délimités à la main². Le *réseau hydrologique pertinent* ainsi obtenu a été utilisé pour calculer l'**indice de forêts protectrices** (chapitre 5.1 du rapport final).

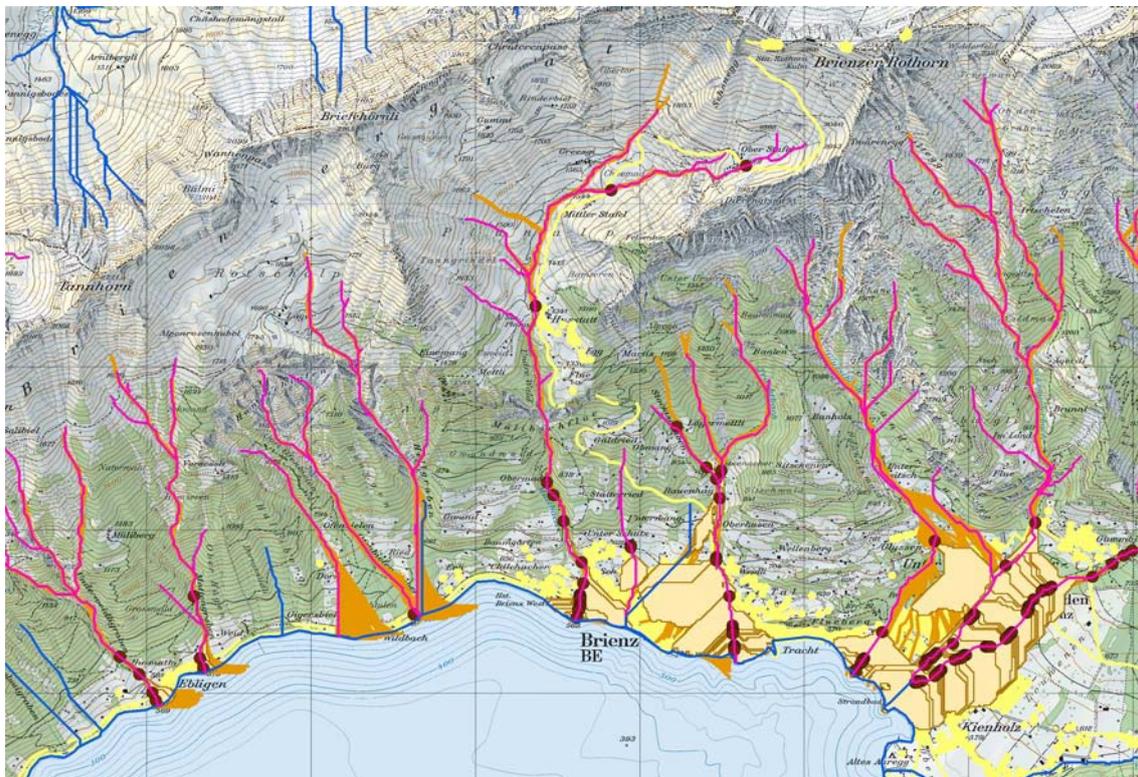


Figure 28: Cours d'eau pertinents (en rouge) délimités en tenant compte des laves torrentielles (en brun) et des épandages d'alluvions (lieux de départ en noir et surfaces atteintes en beige) pertinents, qui touchent un objet susceptible d'être endommagé (en jaune).

Avant de **délimiter les forêts protectrices**, ce *réseau hydrologique pertinent* a été vérifié et affiné par les cantons ; notamment par leurs experts en matière de forêt et d'aménagement des cours d'eau. Ils ont pu ainsi retirer des cours d'eau du réseau ou le compléter là où ils le jugeaient nécessaire. Les compléments apportés devaient tenir compte des points suivants:

- le danger potentiel est attesté par des documents reconnus, utilisés dans l'évaluation des dangers, et il touche un enjeu répondant aux critères harmonisés (tableau 1 du rapport final);
- le réseau hydrologique pertinent peut être complété par des torrents³.

² La délimitation à la main a été très conservatrice: des cours d'eau ou des parties de cours d'eau ont généralement été laissés de côté suivant des avis d'experts.

³ Une définition est esquissée ici pour guider la distinction entre un torrent et une rivière de fond de vallée: un torrent est un cours d'eau de montagne raide, qui enflé parfois considérablement en entraînant de grandes quantités de débris de roche, de sédiments, de terre, de bois ou même des troncs entiers. Il est essentiellement caractérisé par la forte déclivité de son lit et par les brusques variations de son débit consécutives à la fonte de la neige ou à un violent orage.

8.3 Identification des périmètres de processus pertinents liés aux cours d'eau

Enfin, les périmètres de processus pertinent en termes de dommages situés en forêt ont été modélisés pour le *réseau hydrologique pertinent* (afin de déterminer l'indice de forêts protectrices) et pour le *réseau hydrologique pertinent contrôlé* (afin de délimiter les forêts protectrices).

Chaque cours d'eau du réseau a été considéré comme une source de dommages potentielle: le champ d'action des avalanches, des chutes de pierres et de blocs, des coulées de boue et des glissements de terrain liés à chacun d'entre eux a été délimité comme décrit dans le rapport final. Les surfaces déterminantes pour l'apport de bois flottant et pour l'érosion des berges ont aussi été prises en compte en modélisant aux cours d'eau une zone tampon large de 50 m de part et d'autre.

9 Bibliographie

- (1) OFEV, 2008: SilvaProtect-CH Phase 1, Projektdokumentation, 242 p⁴.

EVENT

Modèle numérique de terrain MNT25

- (2) Farin G. 1994: Kurven und Flächen im Computer Aided Geometric Design (CAGD): eine praktische Einführung. Friedrich Vieweg Verlag.
- (3) Schneider B. 1998: Geomorphologisch plausible Rekonstruktion der digitalen Repräsentation von Geländeoberflächen aus Höhenliniendaten. Dissertation, Universität Zürich. GeoProcessing Series Vol. 35,
- (4) swisstopo 2005: DHM25 – Produktinformation.
<http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/height/dhm25.html>

Avalanche

- (5) Barbolini M., Gruber U., Keylock C., Naaim M. and Savi, F. 2000. Application and evaluation of statistical and hydraulic-continuum dense-snow avalanche models to five real European sites. Cold Regions Science and Technology, 31(2): 133-149.
- (6) Bartelt P., Salm B. and Gruber U. 1999. Calculating dense-snow runout using a Voellmy-fluid model with active/passive longitudinal straining. Journal of Glaciology, 45(150): 242 – 254.
- (7) Brassel K. and Lischke H. (Editors) 2001. Swiss National Forest Inventory: Methods and Models of the Second Assessment. Swiss Federal Research Institut WSL, Birmensdorf, 336 pp.
- (8) Burkard A. and Salm B. 1992. Die Bestimmung der mittleren Anrissmächtigkeit "d0" zur Berechnung von Fliesslawinen, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, SLF, Davos.
- (9) Gruber U. 1998. Der Einsatz numerischer Simulationsmethoden in der Lawinengefahrenkartierung. PhD Thesis, Zurich, Zürich, 161 pp.
- (10) Gruber U. 2001. Using GIS for avalanche hazard mapping in Switzerland, Proceedings of the 2001 ESRI International User Conference, San Diego, USA,
<http://gis.esri.com/library/userconf/proc01/professional/papers/pap964/p964.htm>.
- (11) Gruber U. and Margreth S. 2001. Winter 1999: A Valuable Test of the Avalanche Hazard Mapping Procedure in Switzerland. Annals of Glaciology, 32: 328 - 332.
- (12) Maggioni M. and Gruber U. 2003. The influence of topographic parameters on avalanche release dimension and frequency. Cold Regions Science and Technology, 37: 407-419.
- (13) Marks D., Dozier J. and Frew J. 1984. Automated basin delineation from digital elevation data. Geo-Processing, 2. pp. 299-311.
- (14) McClung D.M. and Schaerer P. 1993. The Avalanche Handbook. The Mountaineers, Seattle, 271 pp.

⁴ Diese Publikation kann unter gefahrenpraevention@bafu.admin.ch bestellt werden.

- (15) Salm B., Burkard A. and Gubler H.U. 1990. Berechnung von Fließlawinen. Eine Anleitung für den Praktiker mit Beispielen, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, SLF, Davos.
- (16) Sartoris G. and Bartelt P. 2000. Upwinded finite difference schemes for two-dimensional dense snow avalanche modeling. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 32: 799-821.
- (17) Sovilla B. and Bartelt P. 2002. Observations and modelling of snow avalanche entrainment. *Natural Hazards*, 2: 169-179.
- (18) Sovilla B., Margreth S. and Bartelt P. 2005. On entrainment in snow avalanche calculations. Accepted for publication in *Cold Regions Science and Technology*.

Chute de pierres et de blocs

- (19) Keusen H.R. 1998. Das Steinschlaggebiet Abendberg / Eyewald im Diemtigtal. Risikoanalyse und Schutzmassnahmen. *Bull. angew. Geol.*, 3/1: 75-82.
- (20) Liniger M. 2000. Computersimulation von Stein- und Blockschlägen. *Felsbau*, 18/3: 56-63.
- (21) Volkwein A., Melis L., Haller B., Pfeifer R. 2005. Protection from Landslides and High Speed Rockfall Events – Reconstruction of Chapman's Peak Drive, Proc. Structures and Extreme Events, IABSE Symposium, Lissabon.
- (22) Zinggeler A. 1990. Steinschlagsimulation in Gebirgswäldern. Modellierung der relevanten Teilprozesse. Diplomarbeit (nicht publiziert), Geographisches Institut der Universität Bern.

Coulée de boue / glissement de terrain

- (23) BWG, WSL 2003. Oberflächennahe Rutschungen ausgelöst durch die Unwetter vom 15.-16.7.2002 im Napfgebiet und vom 31.8.-1.9.2002 im Gebiet Appenzell. Biel.
- (24) Geo7 AG, Schälchli, Abegg + Hunzinger 2003. Unwetter im Napfgebiet vom 15./16. Juli 2002, Ereignisdokumentation. Bern.
- (25) Heinimann H.R. et al. 1998. Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren. Umwelt-Materialien Nr. 85, Naturgefahren. Hrsg. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL). Bern.
- (26) Liener S. 2000. Zur Feststofflieferung in Wildbächen. Dissertation, *Geographica Bernensia G64*, Verlag des Geogr. Inst. Univ. Bern.

Lave torrentielle

- (27) Beven K.J., Lamb R., Quinn P., Romanowicz R., Freer J. 1995. TOPMODEL. In Singh V.P. (Hrsg.) *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Co.
- (28) Gamma P. 2000. dfwalk – Ein Murgang-Simulationsprogramm zur Gefahrenzonierung. *Geographica Bernensia G66*, Verlag des Geogr. Inst. Univ. Bern.
- (29) Kienholz H., Keller H., Ammann W., Weingartner R., Germann P., Hegg Ch., Mani P., Rickenmann D. 1998. Zur Sensitivität von Wildbachsystemen. Vdf Verlag, Zürich.
- (30) Perla R., Cheng T.T., Mc Clung D.M. 1980. A two parameter model of snow avalanche motion. *Journal of Glaciology*, 26/94: 197-208.

(31) Zimmermann M., Mani P., Gamma, P. 1997. Murganggefahr und Klimaänderung - ein GIS-basierter Ansatz. Vdf Verlag, Zürich.

Epannage d'alluvions

(32) Beven, K.J., Lamb, R., Quinn, P., Romanowicz, R., Freer, J. (1995): TOPMODEL. In Singh, V.P. (Hrsg.) Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications, Co.

(33) BWG (2003): Hochwasserabschätzung in schweizerischen Einzugsgebieten. Praxishilfe.

(34) BWW, BRP et BUWAL (Hrsg.;1997): Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Empfehlungen. Bern, 32 S.

(35) Gamma, P. (2000): dfwalk – Ein Murgang-Simulationsprogramm zur Gefahrenzonierung, Geographica Bernensia G66.

(36) Heinemann, H.R. et al. (1998): Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren. BUWAL, Umwelt-Materialien Nr. 85, Naturgefahren.

(37) Kienholz, H., Keller, H., Ammann, W., Weingartner, R., Germann, P., Hegg, Ch., Mani, P., Rickmann, D. (1998): Zur Sensitivität von Wildbachsystemen. Vdf Verlag, Zürich

(38) Perla, R., Cheng, T.T., Mc Clung, D.M., (1980): A two parameter model of snow avalanche motion; Journal of Glaciology, Vol. 26, no. 94: 197-208.

(39) PK25, Swisstopo: Digitale Landeskarte der Schweiz (PK25) im Massstab 1:25'000

(40) SilvaProtect-CH, Schutzwaldhinweiskarte der Schweiz, Modul EVENT, Bericht 05039.1, Geotest AG, geo7 AG, Öko-B AG, 2006

(41) Zimmermann, M., Mani, P., Gamma,P. (1997): Murganggefahr und Klimaänderung - ein GIS-basierter Ansatz. Vdf Verlag, Zürich.

10 Annexe

10.1 Nouvelles classes de la Carte géotechnique de la Suisse

Regroupement des classes de la Carte géotechnique de la Suisse éditée par la Commission géotechnique suisse (CGS) et attributs associés:

- le frottement interne et la perméabilité – toutes les valeurs se référant à la zone pluviométrique 1 – ont été utilisés pour modéliser les coulées de boue;
- la perméabilité (classes), la production d'éboulis et la matrice ont été utilisées pour modéliser les laves torrentielles.

Nouvelle classe	Roche, sous-sol	Attribut GEOTECH (unité géotechnique) Carte géotechnique de la CGS	Frottement interne Φ [°]	Perméabilité [0 à 1] 0 \cong imperméable 1 \cong perméable	Production d'éboulis 1 = faible 2 = moyenne 3 = forte	Matrice 1 = argile-limon 2 = sable-gravier 3 = gravier-blocs
1	Roches argileuses	13,14,18,30,112	19	0,25	3	1
2	Marne argileuse	12,15,17	21	0,30	3	1
3	Marne	31,33,111	23	0,35	3	1
4	Marne gréseuse	10,42,	23	0,40	3	1
5	Grès calcaire	16,19,55	26	0,40	2 / 3	2
6	Calcaire gréseux	21,32	26	0,45	2 / 3	1
7	Dolomie	49	26	0,55	3	2
8	Calcaire	40,41	29	0,45	2	2
9	Calcschiste	11,35,36,37,75,44,110	27	0,55	2 / 3	2
10	Conglomérat	20,45,54, 130	29	0,65	2	2
11	Schiste sériciteux	63,637	33	0,70	2	2
12	Gneiss micacé	59,62,65,66,67,68	35	0,70	2	2
13	Gneiss riche en feldspath	48,60,61,69,120	35	0,80	1 / 2	2 / 3
14	Brèche	22,131	35	0,90	2	2 / 3
15	Calcaire siliceux, radiolarite	43,58	35	0,95	2	2
16	Roches dures, à peine altérées	23,38,46,47,50,51,52, 53,56,57,64,70,71,80, 81,83,84,132	38	0,95	1 / 2	3
17	Interméd. ($\Phi = 19-21^\circ$)	-	20	0,30		
18	Interméd. ($\Phi = 21-23^\circ$)	-	22	0,35		
19	Interméd. ($\Phi = 23-25^\circ$)	-	24	0,40		
20	Interméd. ($\Phi = 25-27^\circ$)	-	26	0,50		
21	Interméd. ($\Phi = 27-29^\circ$)	-	28	0,60		
22	Interméd. ($\Phi = 29-31^\circ$)	-	30	0,65		
23	Interméd. ($\Phi = 31-33^\circ$)	-	32	0,70		
24	Interméd. ($\Phi = 33-35^\circ$)	-	34	0,80		
25	Interméd. ($\Phi = 35-37^\circ$)	-	36	0,90		
26	Interméd. ($\Phi = 37-38^\circ$)	-	37	0,90		
91	Eaux superficielles	90	35	0,80		
92	Glacier	99	35	0,80		

Matrice appliquée pour déterminer l'épaisseur des terrains meubles

Nouvelle classe	Roche, sous-sol	Attribut GEOTECH (unité géotechnique) Carte géotechnique de la CGS	Epaisseur [m]			
			pour une déclivité de			
			< 14°	14° - 40°	40° - 50°	> 50°
1	Roches argileuses	13,14,18,30,112	10,0	1,0	0,5	0,2
2	Marne argileuse	12,15,17	10,0	2,0	1,0	0,2
3	Marne	31,33,111	10,0	2,0	1,0	0,2
4	Marne gréseuse	10,42,	10,0	2,0	1,0	0,2
5	Grès calcaire	16,19,55	10,0	2,0	1,5	0,2
6	Calcaire gréseux	21,32	10,0	2,0	1,5	0,2
7	Dolomie	49	10,0	5,0	1,0	0,2
8	Calcaire	40,41	10,0	2,0	1,0	0,2
9	Calcschiste	11,35,36,37,75,44	10,0	1,5	1,0	0,2
10	Conglomérat	20,45,54,130, 110	10,0	5,0	1,0	0,2
11	Schiste sériciteux	63,637	8,0	2,0	1,0	0,2
12	Gneiss micacé	59,62,65,66,67,68	8,0	5,0	1,0	0,2
13	Gneiss riche en feldspath	48,60,61,69,120	8,0	5,0	1,0	0,2
14	Brèche	22,131	5,0	2,0	1,0	0,2
15	Calcaire siliceux, radiolarite	43,58	5,0	2,0	1,0	0,2
16	Roches dures, à peine altérées	23,38,46,47,50,51,52,53,56,57,64, 70,71,80,81,83,84,132	5,0	2,0	1,0	0,2
91	Eaux superficielles	90				
92	Glacier	99				