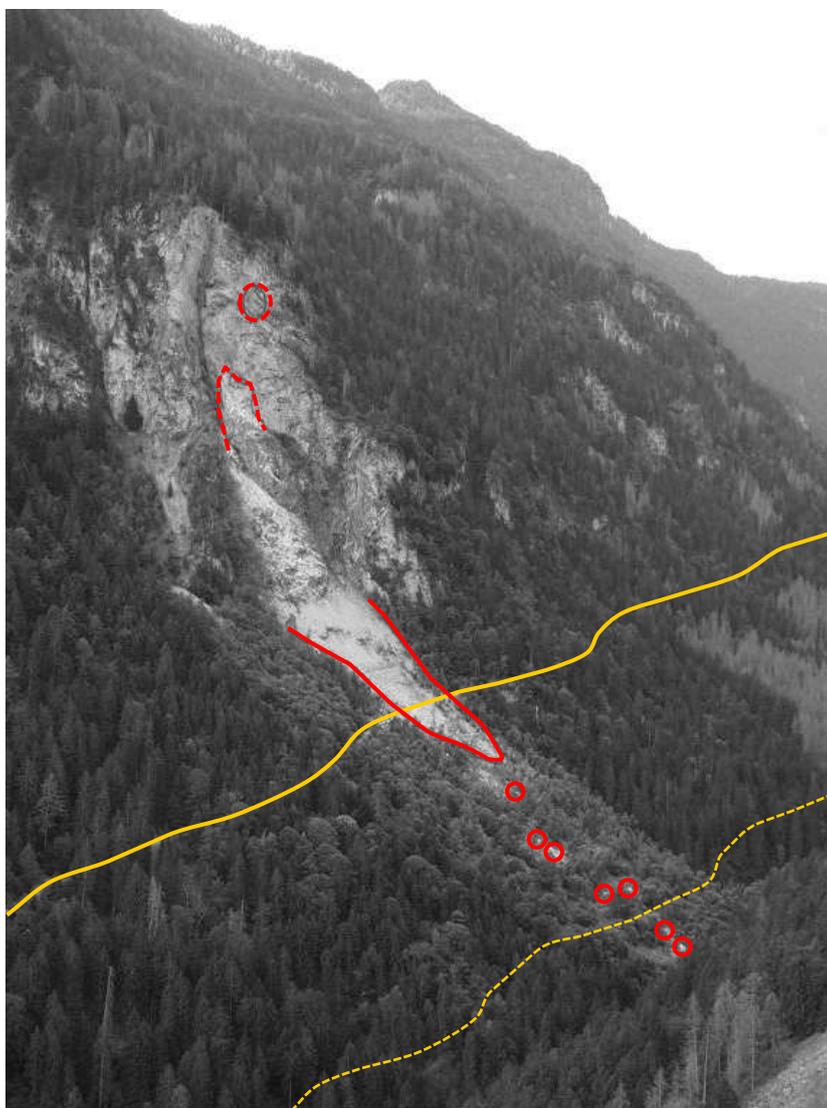


Guide pratique

Définition de la probabilité d'occurrence spatiale $p(rA)$ concernant les processus de chute de pierres et blocs ainsi que d'éboulement

Pour les analyses de risque avec EconoMe



Août 2017



Table des matières

1. Motivation	3
2. Méthodologie	3
2.1.Définition	3
2.2.Evaluation des dangers	4
2.3.Détermination de la p(rA)	5
2.4.Commentaire	7
3. Exemples d'application	8
3.1.Signal de Champex : situation avec une bonne documentaion des événements....	8
3.2.Ganggi, Gondo: situation avec une documentation insuffisante des événements	12
3.3.San Marco, Gondo: Eboulement	17
4. Références utilisées	20

Rédaction :

ARGE Winkler Ingenieure SA / wasser/schnee/lawinen Ingenieurbüro André Burkard AG

Randogne / Brig, 3 mai 2017

Traduction : SFCEP

Image de couverture : Eboulement de Gueuroz, Salvan le 02.07.2016 (env. 2500 m³; la niche d'arrachement est indiquée par le trait tiré rouge). La ligne rouge représente l'étendue de la zone d'influence de l'éboulement alors que les cercles rouges correspondent à des dépôts de blocs ayant suivis des trajectoires isolées (zone d'influence chute de pierres et blocs). La route forestière (trait jaune) est touchée par l'éboulement, le chemin pédestre (trait tiré jaune) par la chute de blocs. Le cercle rouge en falaise indique un compartiment rocheux instable comparable à celui de l'événement.

1. Motivation

Pour pouvoir bénéficier des subventions cantonales et fédérales, la rentabilité des mesures de protection doit être démontrée selon la méthode de calcul EconoMe développée par l'OFEV. Un des paramètres essentiels dans cette méthode de calcul est la *probabilité d'occurrence spatiale* $p(rA)$. Toutefois, il n'existe pas actuellement de méthodologie précise pour déterminer ce paramètre et les disparités dans son évaluation sont importantes.

L'objet de ce guide pratique est de présenter une méthodologie qui permette de déterminer des valeurs de $p(rA)$ de façon homogène à l'échelle du canton pour les processus de chute de pierres et d'éboulement.

La méthodologie présentée doit être considérée comme une solution provisoire qui s'applique jusqu'à ce que des recommandations ou directives nationales soient établies. Dans un souci de maintenir les coûts d'étude à un niveau proportionné à l'investissement global d'un projet, elle ne sera appliquée que pour les projets dont les coûts estimatifs dépassent **CHF 200'000.-** environ. Pour les projets de moindre envergure, il s'agit de clarifier au préalable avec les responsables cantonaux comment seront définies les valeurs de $p(rA)$.

2. Méthodologie

2.1. Définition

Dans la documentation fédérale [1], [2] la probabilité d'occurrence spatiale $p(rA)$ est définie comme suit:

EconoMe [1]: « La probabilité d'occurrence spatiale $p(rA)$ décrit la part de surface réellement affectée par un processus, en rapport à l'ensemble de la zone qui pourrait potentiellement être touchée par ce type de processus, et ce pour une récurrence déterminée ». La *Figure 1* indique, à l'aide de situations théoriques, comment la $p(rA)$ est définie, tant pour des éléments surfaciques que linéaires. Des valeurs $p(rA)$ de référence sont proposées dans EconoMe. Ces valeurs constituent des ordres de grandeur: elles **doivent** être remplacées par les valeurs de $p(rA)$ réelles tenant compte des conditions de terrain ».

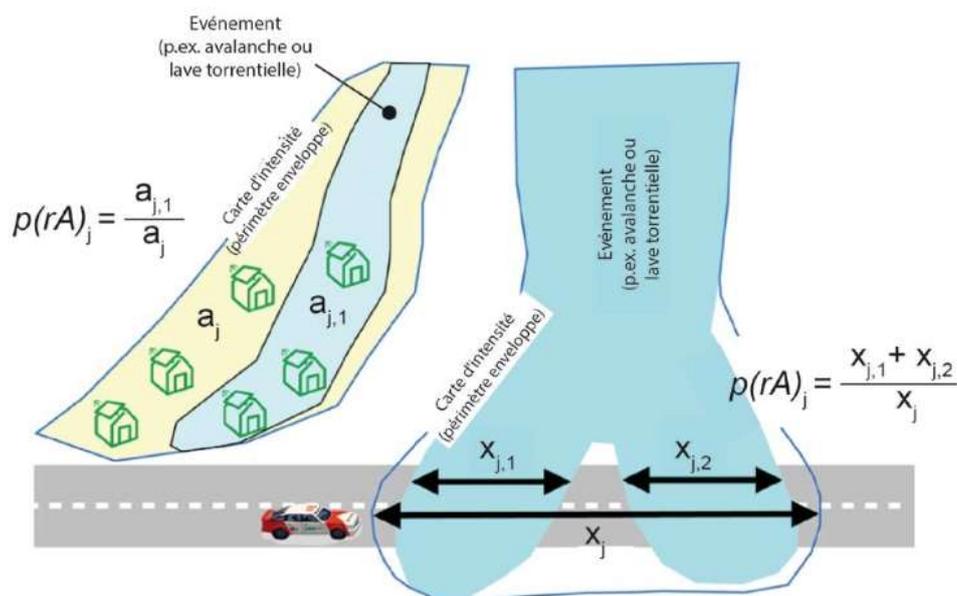


Figure 1: Détermination de la probabilité d'occurrence spatiale pour des objets surfaciques et pour des éléments linéaires [1].

PLANAT [2]: «La probabilité d'occurrence spatiale est la probabilité que, lors de la réalisation d'un processus de danger, celui-ci atteigne un point particulier du

périmètre considéré. Cela découle du fait qu'un événement ne touche en général pas l'ensemble de la surface d'un scénario donné. »¹

L'expérience montre que ces définitions sont interprétées de différentes manières, en particulier pour les processus de chutes de pierres et d'éboulement. C'est pourquoi une méthode de calcul des valeurs de $p(rA)$ est présentée ici et illustrée avec des exemples concrets.

Note :

Actuellement il n'est pas possible de définir une probabilité d'occurrence spatiale pour chaque objet dans EconoMe. C'est pourquoi celle-ci sera définie pour l'ensemble d'un scénario ou d'une période de retour en se référant à l'objet le plus exposé. En cas de doute, la valeur de la $p(rA)$ sera fixée en concertation avec les responsables cantonaux. Dans tous les cas, les choix doivent être justifiés et vérifiables.

2.2. Evaluation des dangers

Lors de la phase de planification des mesures de protection, les études de référence sur l'évaluation des dangers ont en principe déjà été réalisées et les cartes d'intensité sont disponibles [3], [4].

Ci-dessous un rappel des éléments-clés de l'évaluation des dangers qui sont importants pour aider à déterminer la probabilité d'occurrence spatiale :

Cadastre des événements

Une documentation et description détaillées des événements qui ont eu lieu sont une base essentielle pour l'évaluation des dangers et pour déterminer la $p(rA)$.

Scénarios

L'analyse détaillée des aléas est reprise lors de la définition des scénarios, tels que les volumes mobilisés et la dangerosité (probabilité de rupture). Une autre étape consiste à définir, pour chaque scénario (p.ex. temps de retour T30, T100 et T300), le nombre de blocs mobilisés et de les catégoriser en fonction de leur taille sans oublier que les blocs peuvent éclater le long de leurs trajectoires. Dans ce contexte, la taille d'un bloc est représentée par sa longueur d'arête déterminante². Les blocs sont alors regroupés par catégories de de taille comme p.ex. 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m etc.

Le choix du volume mobilisé et le nombre de blocs produits pour chaque scénario doit être pertinent et justifié car cela a une grande influence sur le calcul de la probabilité d'atteinte ainsi que sur la $p(rA)$.

Trajectographies

Des simulations trajectographiques des blocs sont en général réalisées lors de l'évaluation des dangers. Il n'y a pas de recommandation concernant l'utilisation d'un logiciel spécifique. Il est toutefois utile, pour déterminer la $p(rA)$, d'utiliser un logiciel qui permette d'évaluer le nombre de blocs ayant franchi une ligne/distance particulière (cf. chap. 3.2).

Cartes d'intensité

Les cartes d'intensité sont établies selon les recommandations fédérales et cantonales [3], [4].

Probabilité d'atteinte

Cette étape consiste à définir la probabilité avec laquelle un bloc de dimension prédéfinie peut atteindre un secteur donné (voie de chemins de fer, route, bâtiment, zone à bâtir, etc.)

¹ Traduction libre étant donné que la référence n'existe qu'en allemand

² Il s'agit de choisir l'axe du bloc qui est déterminant lors de la chute. En règle générale cela sera le plus grand axe (sauf p.ex. les blocs en forme de disque qui peuvent se mettre sur la tranche; dans quel cas la longueur d'arête déterminante correspondra au plus petit axe).

2.3. Détermination de la p(rA)

Les analyses et résultats obtenus lors de l'évaluation des dangers sont utilisés pour déterminer la probabilité d'occurrence spatiale p(rA). La méthode décrite dans les chapitres suivants peut s'appliquer à des objets ponctuels, surfaciques ou linéaires.

2.3.1. Détermination de la p(rA) pour des objets ponctuels ou surfaciques (bâtiments, zone à bâtir)

Une ligne fictive est tracée horizontalement au niveau de l'objet le plus exposé (en général, le bâtiment situé le plus en amont dans la zone à bâtir) jusqu'à recouper entièrement l'enveloppe d'un événement représentatif ou de la carte d'intensité. Cela permet de définir le tronçon potentiellement touché l_{IKSz} (ligne verte dans la Figure 2). La valeur déterminante sera la longueur effectivement touchée le long de ce tronçon, variable appelée « largeur d'influence b_{Sz} » ci-après.

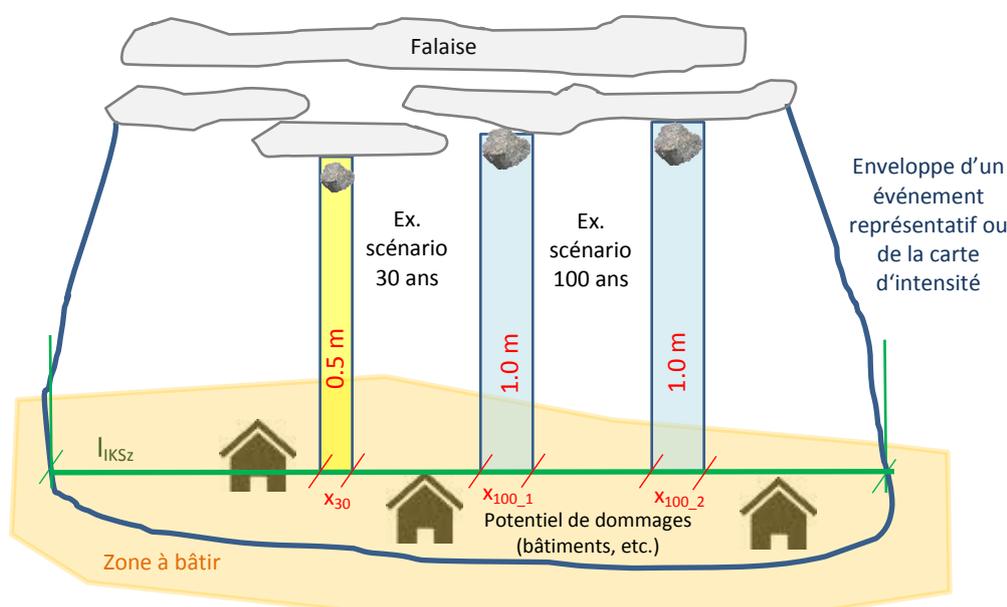


Figure 2: Détermination du tronçon potentiellement touché et largeur d'influence au niveau de l'objet le plus exposé parmi le potentiel de dommages (à définir pour chaque scénario).

La détermination de la p(rA) se calcule d'après la formule suivante:

$$\text{Largeur d'influence } b_{Sz} = \sum (x_{iSz} \times B_{iSz} \times p_{iTrSz})$$

$$p(rA)_{Sz} = \frac{\text{Largeur d'influence } b_{Sz}}{\text{Tronçon potentiellement touché } l_{IKSz}} \leq 1.0$$

x : longueur d'arête [m] B : nombre de blocs [1] p_{Tr} : probabilité d'atteinte [1]
 i : par catégorie de taille s_z : par scénario l_{IKSz} : tronçon potentiellement touché [m]

Largeur d'influence b_{Sz} : La largeur d'influence [m] correspond à la partie effectivement atteinte lors d'un événement représentatif au niveau du tronçon potentiellement touché l_{IKSz} . Elle se définit en tenant compte de la taille des blocs, du nombre de blocs et de la probabilité que l'événement atteigne le tronçon potentiellement touché. Un événement peut comprendre différentes tailles de blocs, dans quel cas les largeurs d'influence sont additionnées. La largeur d'influence se détermine pour chaque scénario.

Volume mobilisable Le volume mobilisable est défini à partir d'un événement représentatif pour le scénario considéré. Ce volume est alors subdivisé en un nombre équivalent de

par scénario :	blocs classés selon leur taille. S'il existe, dans une falaise de grande envergure, plusieurs aléas ayant la même probabilité de rupture, l'événement représentatif pour ce scénario correspondra au volume total des aléas.
Longueur d'arête x_{Sz} :	La longueur d'arête représentative [m] des blocs est définie dans le cadre de l'analyse des événements ou de la définition des scénarios. Pour chaque scénario retenu, les blocs sont regroupés par catégories de taille (0.5 m, 1.0 m, 1.5 m, 2.0 m etc.).
Nombre de blocs B_{Sz} :	Correspond au nombre de blocs constituant l'événement représentatif pour un scénario donné.
Probabilité-d'atteinte p_{Tr} :	La probabilité d'atteinte permet de calculer la proportion des blocs simulés qui atteignent le tronçon potentiellement touché (ligne verte dans la Figure 2). Ce paramètre est important lorsque le calcul de fait à partir de simulations trajectographiques (cf. chap. 3.2). S'il existe des événements bien documentés qui ont atteint la zone considérée, la valeur $p_{Tr} = 1.0$ et le calcul de la $p(rA)$ se fait selon le chap. 3.1.
Tronçon potentiellement touché l_{IKSz} :	Le tronçon potentiellement touché [m] correspond à la largeur maximale qui peut être affectée lors d'un événement à la hauteur de l'objet le plus exposé. Elle se calcule par recouvrement avec l'enveloppe d'un événement représentatif lorsqu'il existe une bonne documentation de celui-ci (cf. chap. 3.1). S'il n'y a pas d'événement représentatif ou que la documentation est insuffisante, le calcul se fait par recouvrement avec l'enveloppe de la carte d'intensité (cf. chap.3.2).
Probabilité d'occurrence spatiale $p(rA)_{Sz}$:	La probabilité que, lors de la réalisation d'un événement, un point particulier soit touché au niveau du périmètre d'étude. La $p(rA)$ est définie pour chacun des scénarios retenus.

Exemple selon Figure 2 :

Pour le scénario 30 ans, l'événement représentatif correspond à un bloc ayant une taille de 0.5 m alors que pour le scénario 100 ans, il s'agit de deux blocs de 1.0 m chacun. La largeur de l'enveloppe de la carte d'intensité à la hauteur du bâtiment le plus exposé est de 40 m pour le scénario 30 ans et 50 m pour le scénario 100 ans.

Les exemples représentés à la Figure 2 donnent ainsi les valeurs de $p(rA)$ suivantes :

$$p(rA)_{30} = \frac{(0.5 \text{ m} \times 1 \times 1.0)}{40 \text{ m}} = 0.013$$

$$p(rA)_{100} = \frac{(1.0 \text{ m} \times 2 \times 1.0)}{50 \text{ m}} = 0.040$$

Scénario 30 ans :

Taille du bloc $x_{30} = 0.5 \text{ m}$; nombre de blocs $B_{30} = 1$; probabilité d'atteinte $p_{Tr30} = 1.0$;

La largeur d'influence correspond à $b_{30} = 0.5 \text{ m}$ ($= x_{30} \times B_{30} \times p_{Tr30}$); rapporté au tronçon potentiellement touché $l_{IK30} = 40.0 \text{ m}$, cela donne une probabilité d'occurrence spatiale $p(rA)_{30} = 0.013$ ($= b_{30} / l_{IK30}$).

Scénario 100 ans :

Taille des blocs $x_{100} = 1.0 \text{ m}$; nombre de blocs $B_{100} = 2$; T probabilité d'atteinte $p_{Tr100} = 1.0$;

La largeur d'influence correspond à $b_{100} = 1.0 \text{ m} \times 2 \times 1.0 = 2.0 \text{ m}$ ($= x_{100} \times B_{100} \times p_{Tr100}$); rapporté au tronçon potentiellement touché $l_{IK100} = 50.0 \text{ m}$, cela donne une probabilité d'occurrence spatiale $p(rA)_{100} = 0.04$ ($= b_{100} / l_{IK100}$).

2.3.2. Détermination de la p(rA) le long d'objets linéaires (route, rail, etc.)

Comme pour les objets ponctuels ou surfaciques, il s'agit de définir le tronçon potentiellement touché et la largeur d'influence au niveau de la partie la plus exposée de la route, du rail ou autre objet linéaire.

Les données issues de l'analyse des dangers permettent de définir les scénarios et d'établir la taille et le nombre de blocs. Une mise en situation est présentée de façon schématique à la Figure 3.

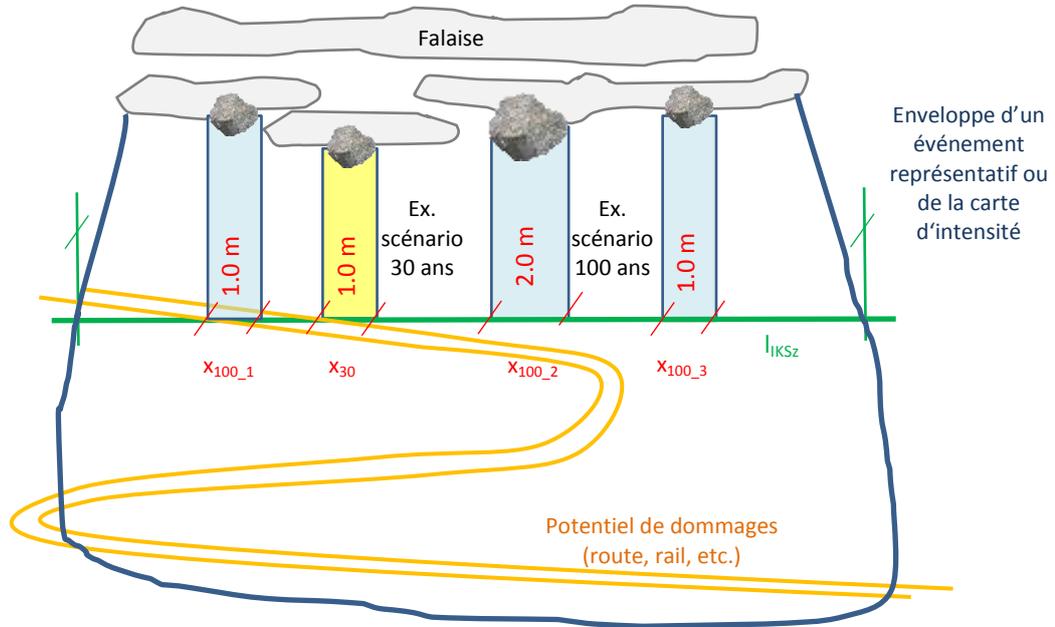


Figure 3 : Détermination du tronçon potentiellement touché et de la largeur d'influence au niveau de la partie la plus exposée du potentiel de dommages (à définir pour chaque scénario).

Exemple selon la Figure 3 :

Pour le scénario 30 ans, l'événement représentatif correspond à un bloc ayant une taille de 1.0 m ; pour le scénario 100 ans, il s'agit de deux blocs de 1.0 m et un bloc de 2.0 m. La largeur de l'enveloppe de la carte d'intensité au niveau de la partie la plus exposée de la route est de 60 m pour le scénario 30 ans et 80 m pour le scénario 100 ans. Les exemples représentés à la Figure 3 donnent ainsi les valeurs de p(rA) suivantes :

$$prA_{30} = \frac{(1.0 \text{ m} \times 1 \times 1.0)}{60 \text{ m}} = 0.017$$

$$prA_{100} = \frac{(1.0 \text{ m} \times 2 \times 1.0 + 2.0 \text{ m} \times 1 \times 1.0)}{80 \text{ m}} = 0.05$$

2.4. Commentaire

Ces exemples illustrent que la définition des scénarios joue un rôle déterminant pour le calcul de la p(rA). Avec une probabilité d'atteinte identique, un bloc de 25m³ donnera une p(rA) beaucoup plus faible que si celui-ci se fractionne en 25 blocs de 1m³. La taille des blocs, définie à partir des longueurs d'arêtes, n'évolue pas de façon linéaire avec le volume effectif de ceux-ci. Le bloc cubique de 25 m³ touchera seulement 3 m de la route alors que 25 blocs de 1m³ chacun toucheront 25 m de la route (= 25 x 1.0 m).

La définition des scénarios doit donc être réalisée avec la plus grande diligence et documentée en conséquence.

Le nombre de blocs pouvant atteindre le potentiel de dommages augmente plus l'on se rapproche de l'aléa et plus celui-ci est volumineux. En théorie, il est ainsi possible d'obtenir une $p(rA)$ supérieure à 1 (l'effet de superposition n'étant pas pris en compte dans la méthode). Dans ces cas-là, il s'agit de revoir la configuration initiale. Il est en effet possible que la situation s'apparente davantage à celle d'un éboulement (même si le volume mobilisable est $<100 \text{ m}^3$). Il est souvent plus pertinent, dans de tels cas, d'appliquer les valeurs de référence pour l'éboulement au lieu d'un calcul basé sur le nombre et la taille des blocs (cf. chap. 3.3).

3. Exemples d'application

La méthodologie définie ci-dessus est appliquée, dans ce qui suit, à 3 exemples concrets représentatifs des situations suivantes:

- 1) Situation avec une bonne documentation des événements ;
- 2) Situation avec une documentation insuffisante des événements ;
- 3) Eboulement.

Dans le premier cas, le calcul de la $p(rA)$ peut se baser sur des données existantes, alors que pour le deuxième cas, des simulations trajectographiques complémentaires seront souvent nécessaires. Pour le cas de l'éboulement, l'approche à choisir dépendra du contexte. L'objectif de la méthode est d'exploiter au maximum les données existantes et d'entreprendre des investigations complémentaires uniquement lorsqu'il est impossible de tirer des conclusions à partir des événements.

3.1. Signal de Champex : situation avec une bonne documentation des événements

Contexte

Les falaises du Signal de Champex (commune d'Orsières) sont actives et menacent un chemin pédestre, la route communale, plusieurs bâtiments en zone à bâtir ainsi que la route cantonale (Figure 4, [5], [6]).



Figure 4 : Vue d'ensemble avec les falaises (en jaune), le pierrier actif (flèches rouges) et une partie des objets menacés (bleu). De [6].

Analyse des événements

Les événements suivants ont été documentés:

Plusieurs événements ont eu lieu en **2014**. Un bloc d'env. 50 litres s'est arrêté sur la route (Chemin du Bisse) située au-dessus de la résidence du Mont Lac. Plus au sud, plusieurs blocs (>200 l) se sont arrêtés dans la forêt juste au-dessus de la zone à bâtir.

Le **6 octobre 2015** un bloc de 150 l est stoppé par la barrière séparant la route de la résidence du Mont Lac. D'autres blocs se sont arrêtés dans le voile d'éboulis ou ont été stoppés par des arbres.

Un autre événement s'est produit la nuit du **19 avril 2016**. Plusieurs blocs de différentes tailles (volume maximal 0.8 m^3) ont atteint la zone à bâtir en-dessus de la résidence du Mont Lac. Une partie des blocs se sont arrêtés sur la route, d'autres contre la façade d'une maison ; un bloc a été stoppé par un panneau solaire bordant la route. D'autres blocs sont restés plus haut dans la forêt ou les éboulis.



Figure 5 : Relevé des blocs issus des événements qui ont atteint la zone à bâtir depuis 2012 (selon [5]).



Figure 6 : Evaluation de l'événement du 19.04.2016. Vue de détail au-dessus de la résidence du Mont Lac [7].

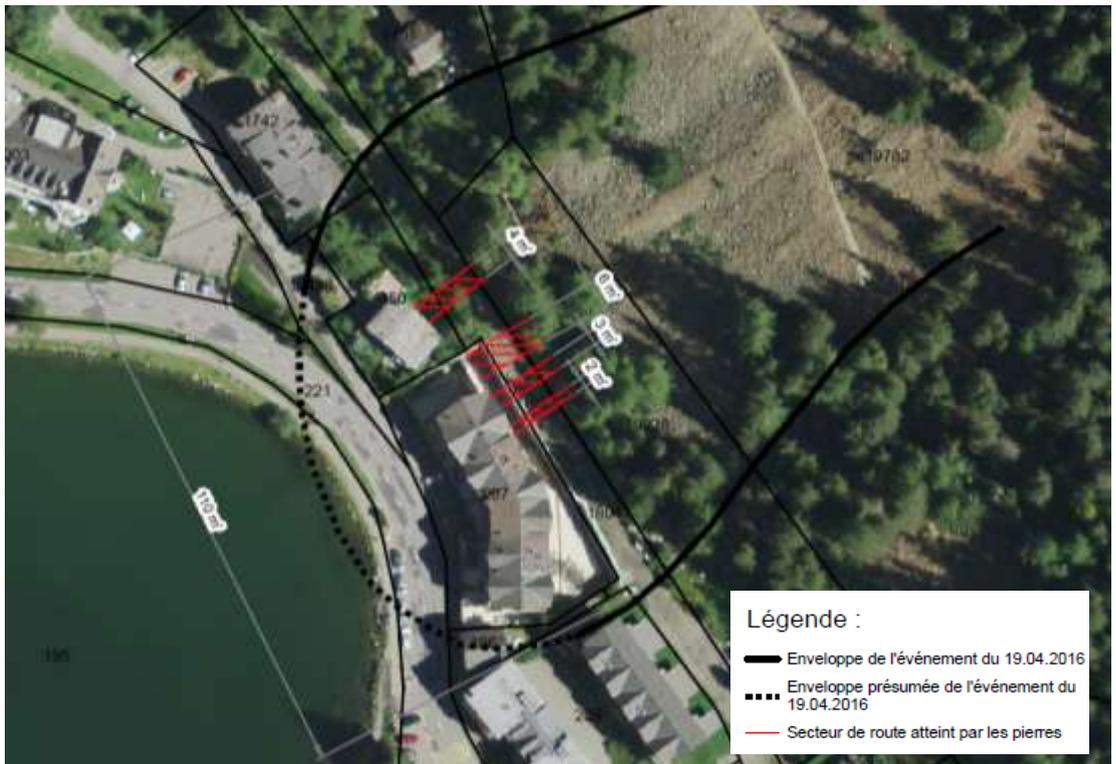


Figure 7 : Evaluation de l'événement du 19.04.2016. En rouge les secteurs touchés par des blocs au niveau de la route. En noir l'enveloppe de l'événement (estimée sur la base de l'analyse de l'événement). Cet événement a été considéré représentatif du scénario 30 ans. Selon [6].

Définition des scénarios

Les aléas, les scénarios ainsi que le nombre et la taille des blocs ont été évalués et définis dans le cadre de la cartographie des dangers [5].

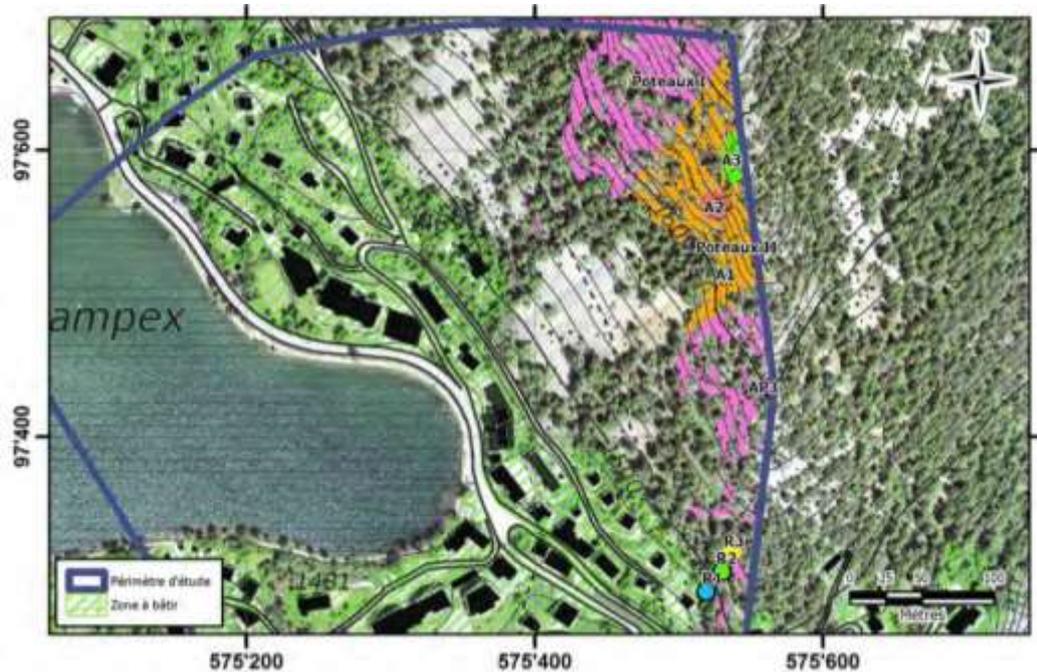


Figure 8: Extrait de la carte des aléas (selon [5]).

- > Les éléments issus de la définition des scénarios et de l'analyse des événements permettent de définir les événements représentatifs pour chaque scénario dans le périmètre d'étude.
- > Si plusieurs aléas sont représentatifs d'un scénario, on additionnera les largeurs d'influence issues de chacun de ces aléas.
- > La $p(rA)$ sera définie en mettant en relation la largeur d'influence totale avec la longueur du tronçon potentiellement touché.
- > Pour les scénarios où l'on ne dispose pas d'événements documentés, il est possible d'extrapoler la valeur de la $p(rA)$ à partir de la/les valeur(s) calculée(s) et sur la base de l'analyse des aléas.

Calcul de la $p(rA)$

Scénario 30 ans

Après analyse et interprétation du cadastre des événements et de la cartographie des dangers [5], l'événement du 19.04.2016 est considéré comme représentatif pour le scénario 30 ans.

La largeur d'influence est calculée à partir des blocs ayant atteint ou dépassé la route (représentant ici l'objet le plus exposé). Le relevé des blocs de la Figure 6 permet de mesurer la largeur d'influence au niveau de la route. L'enveloppe de l'événement permet de déterminer le tronçon potentiellement touché (l_{KSz}). La vue aérienne de la Figure 7 montre les largeurs d'influence des blocs et l'enveloppe de l'événement. La probabilité d'occurrence spatiale se calcule alors comme suit :

$$p(rA)_{Sz} = \frac{\text{Largeur d'influence } bs_z}{\text{Tronçon potentiellement touché } l_{KSz}}$$

$$p(rA)_{30} = \frac{4 + 6 + 3 + 2 \text{ m}}{110 \text{ m}} = \frac{15 \text{ m}}{110 \text{ m}} = 0.14$$

Les valeurs de $p(rA)$ pour les autres scénarios sont extrapolés à partir du scénario 30 ans.

- > *Scénario 10 ans* : un bloc de 150 l (largeur d'influence = 0.5 m) atteint le niveau de la route. La longueur du tronçon potentiellement touché est estimée à 50 m.
- > *Scénario 100 ans* : le volume mobilisé est environ 6 fois plus grand que pour T30 ; on admet que la largeur d'influence augmente du même facteur, soit environ 90 m. Le tronçon potentiellement touché est estimé à environ 3 fois la longueur de T30 (360 m).
- > *Scénario 300 ans* : identique au scénario 100 ans (pas d'évolution par rapport à T100).

Les valeurs de $p(rA)$ obtenues sont indiquées dans le *Tableau 1*.

	T10	T30	T100	T300
p(rA)	0.01	0.14	0.25	0.25
Commentaires	1 Bloc de 150 l atteint la route 0.5 m / 50 m	Calcul basé sur l'événement du 19.04.2016 15 m / 110 m (cf. ci-dessus)	Extrapolé à partir de T30 90 m /360 m	Identique à T100

Tableau 1: Détermination de la $p(rA)$ pour les différents scénarios considérés à partir de l'événement de 2016 et de l'analyse des aléas.

3.2. Ganggi, Gondo: situation avec une documentation insuffisante des événements

Dans cet exemple, les informations issues du cadastre des événements sont insuffisantes de sorte que la probabilité d'occurrence spatiale soit être déterminée à l'aide de simulations trajectographiques.

Contexte

Une falaise de 350 m de hauteur se situe à 100-200 m de la route du Simplon. Il y a de nombreux blocs et compartiments instables. Un pierrier grossier, actif, se développe en pied de falaise. Environ tous les 10 ans, un événement arrive à proximité de la route. Les blocs relevés au niveau de la route ont des volumes de 0.5-1.5 m³. Les blocs issus d'événements plus fréquents s'arrêtent en général dans le pierrier. Ainsi, en janvier 2016, env. 5 m³ de matériaux se sont détachés de la falaise. Le plus gros bloc (1.25 m³) s'est arrêté dans la partie aval du pierrier.

L'analyse structurale de la falaise révèle que le rocher est passablement fracturé de sorte que des aléas d'un volume supérieur à 5 m³ sont plutôt rares. Par contre la mobilisation de plusieurs compartiments en différents endroits de la falaise est tout à fait probable [8].



Figure 9: Vue en direction de la falaise de Ganggi.

Définition des scénarios

- > **Scénario 10 ans:** cinq blocs de 0.75 m^3 sont mobilisés sur l'ensemble de la falaise.
- > **Scénario 30 ans:** deux compartiments rocheux d'env. 9 m^3 chacun sont mobilisés dans la falaise. Le volume représentatif de ce scénario est donc de 18 m^3 . Les compartiments rocheux se fractionnent en une vingtaine de blocs répartis en 2 catégories de taille : 14 blocs de 0.75 m^3 et 6 blocs de 1.25 m^3 .
- > **Scénario 100 ans:** trois compartiments rocheux de 25 m^3 chacun sont mobilisés. Chaque compartiment est constitué de 15 blocs de 0.75 m^3 , 5 blocs de 1.25 m^3 et 3 blocs de 2.5 m^3 . Le volume représentatif est donc de 75 m^3 répartis en 9 blocs de 2.5 m^3 , 15 blocs de 1.25 m^3 et 45 blocs de 0.75 m^3 .
- > **Scénario 300 ans:** quatre compartiments de 80 m^3 sont mobilisés formant les catégories de blocs suivantes : 3 x 5.0 m^3 ; 8 x 2.5 m^3 , 12 x 1.25 m^3 et 40 x 0.75 m^3 . Le volume total représentatif pour ce scénario est donc de 320 m^3 répartis en 12 blocs de 5.0 m^3 ; 32 blocs de 2.5 m^3 , 48 blocs de 1.25 m^3 et 160 blocs de 0.75 m^3 .

Ces scénarios sont résumés dans le *Tableau 2*.

Volume des blocs [m ³]	Cat. de taille [m]	Nombre de blocs / scénario			
		T10 (3.75 m ³)	T30 (2 x 9 m ³)	T100 (3 x 25 m ³)	T300 (4 x 80 m ³)
0.75 (1.1 x 1.0 x 0.7)	1.0	5	14	45	160
1.25 (1.7 x 1.0 x 0.75)	1.5	-	6	15	48
2.5 (2.3 x 1.4 x 0.8)	2.0	-	-	9	32
5.0 (2.8 x 1.8 x 1.0)	2.5	-	-	0	12
Total		5	20	69	252

Tableau 2: Répartition possible des blocs à partir des scénarios.

Note :

Un choix avisé et pertinent de la taille des blocs est très important car cela a une grande influence sur la probabilité d'atteinte ainsi que la p(rA).

Cartes d'intensité

Les cartes d'intensité ont été réalisées lors de la cartographie des dangers. Un extrait de la carte T30 est présenté à la *Figure 10* à titre d'exemple. Le tronçon potentiellement touché I_{IK30} au niveau de la route se calcule par recouplement avec l'enveloppe de la carte d'intensité.

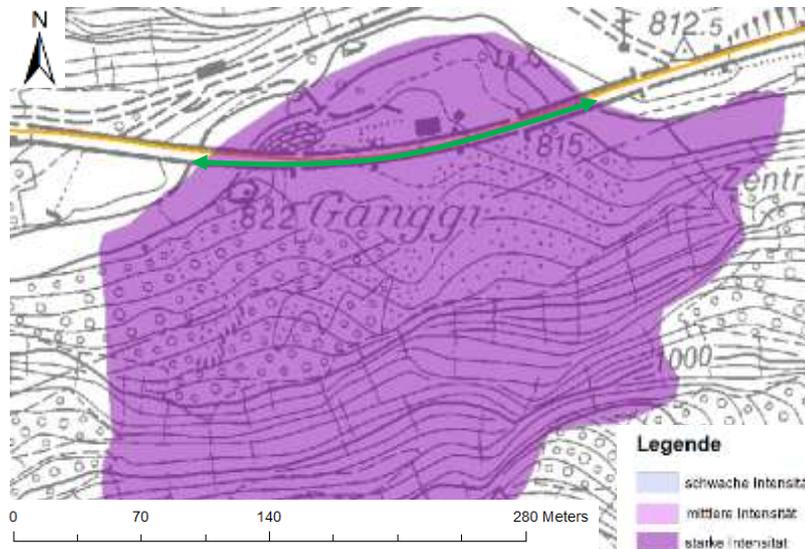


Figure 10: Extrait de la carte d'intensité T30 avec le tronçon potentiellement touché au niveau de la route (230 m ; ligne verte).

Probabilité d'atteinte

A partir du moment où il n'est pas possible de se baser sur les événements pour évaluer le nombre de blocs qui vont atteindre un périmètre donné (route, rail, zone à bâtir, etc.), il faut travailler avec les probabilités d'atteinte pour les différentes tailles de blocs. Celles-ci peuvent être évaluées à partir des études existantes ou calculées à l'aide de logiciels de simulations trajectographiques.

Dans cet exemple, le logiciel Rockyfor3D a été utilisé. La part des blocs passant une section de contrôle (placée ici en bordure amont de la route) est calculée à partir de 100'000 trajectographies et ce pour chaque catégorie de blocs. Ainsi pour les blocs de 0.75 m^3 , 20% atteignent la route (20'600 / 103'000) et 21% pour les blocs de 1.25 m^3 (21'650 / 103'000). Pour les autres catégories de blocs, les probabilités d'atteinte sont les suivantes : $2.5 \text{ m}^3 = 25\%$, $5 \text{ m}^3 = 30\%$. La *Figure 11* montre le résultat graphique de la simulation des blocs de 1.25 m^3 .

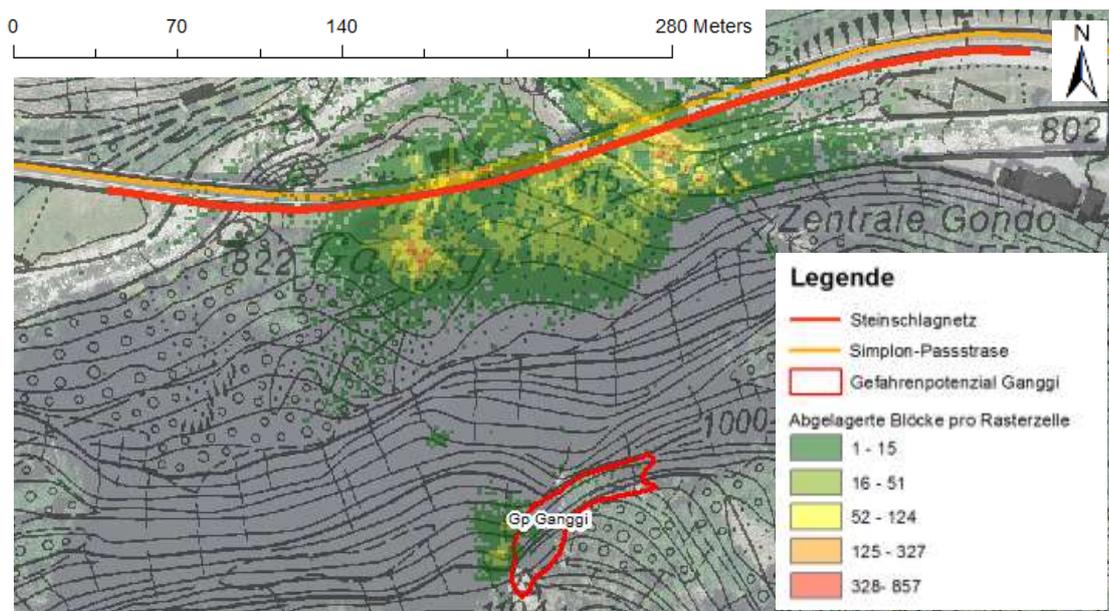


Figure 11: Résultat d'une simulation trajectographique (blocs de 1.25 m^3) indiquant le nombre de blocs déposés (par cellule raster).

Calcul de la probabilité d'occurrence spatiale $p(rA)$

La détermination de la $p(rA)$ se fait selon la méthodologie présentée plus haut, c'est-à-dire en additionnant les largeurs d'influence de chaque catégorie de blocs au niveau du tronçon potentiellement touché. La largeur d'influence est calculée à partir de la taille et du nombre de blocs ainsi que de leur probabilité d'atteinte. Le tronçon potentiellement touché est défini à partir de l'enveloppe de la carte d'intensité.

Scénario 10 ans:

Longueur du tronçon pot. touché [m]		200				
Volume mobilisé [m ³]	Volume des blocs [m ³]	Cat. de taille [m]	Nbr. de blocs	Probabilité d'atteinte route	Largeur d'influence [m]	$p(rA)$
3.75 m ³	0.75 m ³ (1.1 x 1.0 x 0.7)	1.0	5	0.2	1.0 = (1.0 m x 5 blocs x 0.20)	0.005 = 1.0 m / 200 m

Tableau 3: Détermination de la largeur d'influence et de la $p(rA)$ pour le scénario 10 ans.

Scénario 30 ans:

Longueur du tronçon pot. touché [m]		230				
Volume mobilisé [m ³]	Volume des blocs [m ³]	Cat. de taille [m]	Nbr. de blocs	Probabilité d'atteinte route	Largeur d'influence [m]	$p(rA)$
18.0 m ³	0.75 m ³ (1.1 x 1.0 x 0.7)	1.0	14	0.2	4.69 = (1.0 m x 14 blocs x 0.20 + 1.5 m x 6 blocs x 0.21)	0.020 = 4.69 m / 230 m
	1.25 m ³ (1.7 x 1.0 x 0.75)	1.5	6	0.21		

Tableau 4: Détermination de la largeur d'influence et de la $p(rA)$ pour le scénario 30 ans.

Scénario 100 ans:

Longueur du tronçon pot. touché [m]		250				
Volume mobilisé [m ³]	Volume des blocs [m ³]	Cat. de taille [m]	Nbr. de blocs	Probabilité d'atteinte route	Largeur d'influence [m]	p(rA)
75 m ³	0.75 m ³ (1.1 x 1.0 x 0.7)	1.0	45	0.2	18.23 = (1.0 m x 45 blocs x 0.20 + 1.5 m x 15 blocs x 0.21 + 2.0 m x 9 blocs x 0.25)	0.073 =18.23 m / 250 m
	1.25 m ³ (1.7 x 1.0 x 0.75)	1.5	15	0.21		
	2.50 m ³ (2.3 x 1.4 x 0.8)	2.0	9	0.25		

Tableau 5: Détermination de la largeur d'influence et de la p(rA) pour le scénario 100 ans.

Scénario 300 ans:

Longueur du tronçon pot. touché [m]		270				
Volume mobilisé [m ³]	Volume des blocs [m ³]	Cat. de taille [m]	Nbr. de blocs	Probabilité d'atteinte route	Largeur d'influence [m]	p(rA)
320 m ³	0.75 m ³ (1.1 x 1.0 x 0.7)	1.0	160	0.20	72.12 = (1.0 m x 160 blocs x 0.20 + 1.5 m x 48 blocs x 0.21 + 2.0 m x 32 blocs x 0.25 + 2.5 m x 12 blocs x 0.3)	0.267 =72.12 m / 270 m
	1.25 m ³ (1.7 x 1.0 x 0.75)	1.5	48	0.21		
	2.50 m ³ (2.3 x 1.4 x 0.8)	2.0	32	0.25		
	5.00 m ³ (2.8 x 1.8 x 1.0)	2.5	12	0.30		

Tableau 6: Détermination de la largeur d'influence et de la p(rA) pour le scénario 300 ans.

3.3. San Marco, Gondo: Eboulement

Contexte

A San Marco, dans une falaise de 80 m de hauteur, il y a un compartiment rocheux instable d'env. 1000 m³. Il se situe à quelques 125 m de la route du Simplon. Le pied de la falaise est constitué d'un voile d'éboulis recouvert par la forêt qui s'étend presque jusqu'à la route. Aucun événement n'est connu [9].



Figure 12: Vue sur l'aléa de San Marco [9].

Note

En considérant un aléa d'éboulement, il s'agit en premier lieu de déterminer dans quelle zone de processus se situe l'objet considéré (dans le cas présent, la route). Si l'objet est à l'intérieur de la zone où les dépôts de blocs se font en masse (type avalanche rocheuse), il est plus adapté d'utiliser les valeurs du *Tableau 7* (valeurs de référence EconoMe). Par contre, si l'objet se situe dans la zone plus lointaine dominée par des trajectoires isolées de blocs, il s'agit de définir les valeurs de $p(rA)$.

	< T30	T30	T100	T300	Extrême
$p(rA)$	0.8	0.8	0.7	0.9	1

Tableau 7: Valeurs $p(rA)$ de référence pour l'éboulement.

Dans l'exemple de San Marco, la route du Simplon se situe au-delà de la « zone d'avalanche rocheuse ». La valeur de la $p(rA)$ doit donc être déterminée.

Définition des scénarios

L'analyse structurale a permis de déterminer la dangerosité, le volume mobilisable ainsi que la taille des blocs. Le volume de l'aléa de San Marco est estimé à 1'000 m³ avec une probabilité de mobilisation correspondant à un scénario 100 ans. L'espacement des

discontinuités est relativement grand et la schistosité très peu marquée, ce qui peut engendrer des blocs isolés assez volumineux (Tableau 8).

Volume mobilisable [m ³]	Volume des blocs [m ³]	Cat. de taille [m]	Nbr. de blocs	Volume par cat. [m ³]
1'000 m ³	25,0 (4,6 x 3,0 x 1,8)	4,0	8	200
	10,0 (3,5 x 2,0 x 1,5)	3,0	20	200
	5,0 (2,5 x 1,8 x 1,1)	2,0	40	200
	1,0 (1,3 x 1,0 x 0,8)	1,0	200	200
	0,5 (1,0 x 0,8 x 0,6)	1,0	400	200
	Total			668

Tableau 8: Répartition du volume mobilisable en fonction de la taille et du nombre de blocs pour l'aléa de San Marco.

Carte d'intensité

La Figure 13 reproduit un extrait de la carte d'intensité T100 représentative de la mobilisation de l'aléa de San Marco.

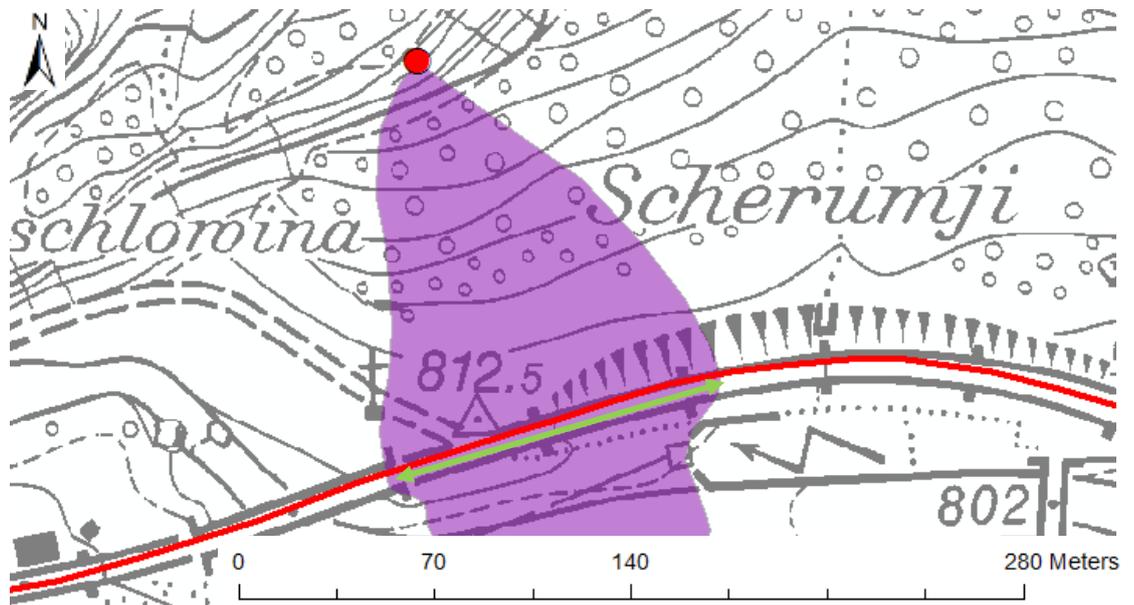


Figure 13: Carte d'intensité T100 - éboulement de San Marco. Le tronçon potentiellement touché au niveau de la route est de 120 m (flèche verte).

Probabilité d'atteinte

L'événement ne peut pas être synthétisé à l'aide d'une taille de blocs standard. Comme pour l'exemple 3.2, il faut définir, pour chaque catégorie de blocs, la probabilité d'atteinte au niveau de la route. La Figure 14 indique le résultat de la simulation pour les blocs de 1 m³; les autres résultats (0,5 m³, 5 m³, 10 m³ et 25 m³) n'étant pas reproduits ici.

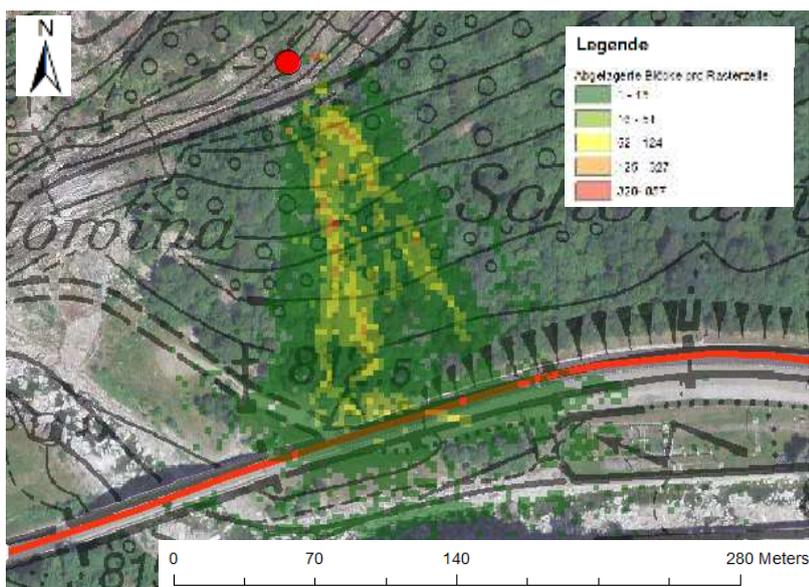


Figure 14: Résultat de la simulation trajectographique pour les blocs de 1 m³ (nombre de blocs déposés par cellule raster). Section de contrôle en rouge

Sur 112'000 trajectographies simulées, 9'260 blocs passent la section de contrôle, soit 8.25%. Le *Tableau 9* indique le calcul de la largeur d'influence pour chaque catégorie de blocs ainsi que la p(rA) résultante.

Volume mobilisé [m ³]	Volume des blocs [m ³]	Cat. taille [m]	Nbr. de blocs	Probabilité d'atteinte route	Largeur d'influence [m]	p(rA)
1'000 m ³	0.5 m ³ (1.0 x 0.8 x 0.6)	1.0	400	0.01	40.28 (1.0 m x 400 blocs x 0.01 + 1.0 m x 200 blocs x 0.08 + 2.0 m x 40 blocs x 0.12 + 3.0 m x 20 blocs x 0.13 + 4.0 m x 8 blocs x 0.09)	0.336 =40.28 m / 120 m
	1 m ³ (1.3 x 1.0 x 0.8)	1.0	200	0.08		
	5 m ³ (2.5 x 1.8 x 1.1)	2.0	40	0.12		
	10 m ³ (3.5 x 2.0 x 1.5)	3.0	20	0.13		
	25 m ³ (4.6 x 3.0 x 1.8)	4.0	8	0.09		

Tableau 9: Détermination des largeurs d'influence et de la p(rA) pour l'aléa de San Marco.

4. Références utilisées

- [1] OFEV. Glossaire EconoMe. Version 6.1, Juin 2010.
- [2] PLANAT Glossar. Risikokzept für Naturgefahren – Leitfaden. Version: 26. Februar 2009 (en allemand uniquement).
- [3] Service des forêts, des cours d'eau et du paysage. Canton du Valais. Cahier des charges pour l'évaluation des processus et l'élaboration des cartes de danger géologiques.
- [4] OFEV 2016: Protection contre les dangers dus aux mouvements de terrain. Aide à l'exécution concernant la gestion des dangers dus aux glissements de terrain, aux chutes de pierres et aux coulées de boue. Office fédéral de l'environnement, Berne. L'environnement pratique n° 1608: 98 p.
- [5] Bureau d'ingénieurs et géologues Tissières SA. Versant Sud-Ouest du Signal à Champex-Lac. Mise à jour de la carte de danger "chute de pierres" du versant Sud-Ouest du Signal et proposition de mesures de protection. Martigny, 16 juin 2016.
- [6] Nivalp SA. Signal - Champex. Commune d'Orsières. Projet de défense contre les chutes de pierres. Etude préliminaire. Rapport technique. Le Châble, août 2016
- [7] Service des forêts, des cours d'eau et du paysage, Service de la mobilité. Photos et informations diverses. Sion, février 2017.
- [8] Burchard GmbH. Steinschlagschutz Ganggi - San Marco, Gondo-Zwischbergen. Arbeitssicherheit Damm Ganggi. Brig-Glis, 08. März 2016
- [9] Burchard GmbH. Steinschlagschutz San Marco, Gondo-Zwischbergen. Gefahrenpotenziale A5 und A6. Brig-Glis, 29 August 2016.