



# Fiche d'information

Etat: février 2022

---

## Utilisation de modèles pour l'évaluation des dangers de chute de pierres



## Impressum

### Éditeur

Office fédéral de l'environnement (OFEV)

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

### Auteurs

Bernard Loup (division Prévention des dangers, OFEV)

Luuk Dorren (Haute école spécialisée bernoise BFH-HAFL)

### Ont également contribué

Reto Baumann, Patrizia Köpfli, Hugo Raetzo (division Prévention des dangers, OFEV) et Arthur Sandri (anciennement à la division Prévention des dangers, OFEV)

### Précision concernant la présente version

La présente fiche d'information est une version révisée d'une ébauche ayant fait l'objet d'une consultation restreinte au printemps 2020. Les services spécialisés et les personnes ci-après avaient participé à cette consultation.

Division Dangers naturels (DDN, BE), Abteilung Naturgefahren & Schutzbauten (AWN, GR), Laurent Chaignat (ENV, JU), Ueli Gruner (Kellerhals + Haefeli AG), Marc Hauser (CFF), Sébastien Lévy (DGE, VD), Alexandre Loye (Geotest SA), Andrea Pedrazzini (SFor-UPIP, TI), section Dangers naturels (SFCEP, VS), David Siffert (division Prévention des dangers, OFEV), Damian Steffen (geoformer igp AG), Hans-Heini Utelli (Impuls AG), Nicole Viguiet (BLS).

### Référence bibliographique

OFEV 2022 : Utilisation de modèles pour l'évaluation des dangers de chute de pierres – Fiche d'information. Office fédéral de l'environnement, Berne, 17 pages.

### Photo de couverture

Chute de pierres au lac de Gelmer ; photo prise par un inconnu dans les environs du col du Grimsel le dimanche 20 août 2017, commune de Guttannen, dans le canton de Berne (image : zvg/Handout/Kantonspolizei Bern)

### Téléchargement au format PDF

[www.bafu.admin.ch](http://www.bafu.admin.ch)

Il n'existe aucune version imprimée.

Cette publication est également disponible en allemand.

© OFEV 2022

**Table des matières**

1.	Introduction .....	4
2.	Types de modèles et propriétés des modèles.....	5
3.	Niveaux d'étude .....	7
3.1	Carte indicative des dangers (échelle sommaire, E1) .....	7
3.2	Carte des dangers (échelle moyenne, E2) .....	8
3.3	Étude de détail et planification de mesures (échelle fine, E3) .....	8
4.	Déroulement de l'évaluation des dangers des chutes de pierres sur la base de modèles .....	8
4.1	Travaux préparatoires (étape 1).....	9
4.2	Définition des scénarios (étape 2).....	10
4.3	Simulation de chutes (étape 3) .....	12
4.4	Calibrage et plausibilisation des résultats des modèles (étape 4).....	14
4.5	Détermination de la portée, des énergies et des hauteurs de rebond (étape 5) .....	14
4.6	Élaboration des cartes des intensités et des dangers (étape 6).....	15
5.	Incertitudes et traçabilité.....	15
6.	Synthèse .....	16
	Sources utilisées et citées .....	17

## 1. Introduction

### Contexte

Les processus de chute (chute de pierres et de blocs, éboulements et écroulements) peuvent menacer des zones habitées, des infrastructures et des installations ainsi que mettre en danger des personnes. Pour évaluer les dangers et les risques liés à ces processus, il faut non seulement identifier les sources des processus et estimer, sur les sites concernés, les volumes de rupture et les probabilités de leur décrochement, mais aussi déterminer les intensités et les probabilités d'occurrence à la hauteur des dommages potentiels.

Les modélisations numériques pour les processus de chute constituent désormais un instrument essentiel pour évaluer les dangers et les risques liés aux chutes. Elles fournissent notamment des bases pour déterminer les intensités, les hauteurs de rebond et les trajectoires des processus de chute, mais également des informations sur la zone de processus (secteur menacé) ou sur les probabilités d'atteinte et d'accumulation des pierres et des blocs.

Tous les modèles actuellement utilisés tentent de représenter les processus de chute de la manière la plus réaliste possible, avec leurs forces et leurs faiblesses. Cependant, ce souci de fidélité s'accompagne d'une grande variabilité dans les résultats des simulations, qu'il convient de classer et d'interpréter correctement. La présente fiche d'information constitue une aide en la matière.

Elle aborde les questions suivantes :

- comment intégrer une simulation aux différentes étapes de l'évaluation des dangers liés aux processus de chute ;
- comment améliorer la qualité (fiabilité, précision et traçabilité) et la comparabilité des simulations des processus de chute indépendamment du logiciel utilisé ;
- comment se servir au mieux des modélisations des processus de chute et en tirer des résultats réalistes, en d'autres termes comment représenter la réalité et le danger de la manière la plus « correcte » et plausible possible, en fournissant des résultats ni trop optimistes ni trop pessimistes (conservateurs) ;
- comment éviter les écueils et situer les limites des simulations.

Du point de vue du contenu, le présent document se fonde sur Rovina et al. (2011), Dorren et al. (2012) et OFEV (2016). Ces publications ainsi que Volkwein et al. (2011) contiennent des informations complémentaires. L'article de Volkwein et al. comprend par ailleurs une description des différents modèles physiques (méthodes « rigid-body », « lumped-mass » et « hybrid »). En outre, les supports du cours pratique de la FAN (Stoffel et al. 2019) renferment des informations détaillées sur l'état actuel des connaissances en matière d'évaluation des dangers de chute ainsi que sur le déroulement standard d'une évaluation des dangers de chute.

### Termes

Les types de processus, les définitions et les termes employés ne sont pas expliqués en détail dans la présente fiche d'information. Les lecteurs se référeront aux publications susmentionnées, en particulier à l'aide à l'exécution de l'OFEV (2016) et au guide pratique de Steffen et al. (2021).

### Public cible

La fiche d'information s'adresse avant tout aux spécialistes devant réaliser des évaluations des dangers de chute, aux exploitants de programmes de simulation, aux utilisateurs des résultats des simulations, puis enfin aux mandants de telles simulations.

Pour faciliter la lecture du document, le masculin générique est utilisé pour désigner les deux sexes.

## Portée de cette publication

La présente fiche d'information se donne pour objectif de présenter les connaissances fondamentales et les méthodes nécessaires à l'évaluation des processus de chute sur la base de modélisations. Elle vise ainsi à promouvoir une mise en œuvre aussi uniforme que possible. Elle se conçoit comme un guide pratique et n'a aucun caractère contraignant.

## 2. Types de modèles et propriétés des modèles

Dans le domaine de la modélisation des processus de chutes, on utilise des modèles qui se répartissent en principe en deux groupes : les modèles bidimensionnels d'une part (2D) et les modèles tridimensionnels d'autre part (3D). Selon les pratiques courantes, les modèles 2D sont ceux qui se fondent sur un profil de pente. Les modèles 3D calculent quant à eux des trajectoires de chute sur la base d'un modèle numérique de terrain (MNT) dans un espace à trois dimensions (coordonnées x, y et z). Conformément aux pratiques courantes, la présente fiche emploie respectivement les termes « 2D » pour les modèles avec profils de pente et « 3D » pour les modèles basés sur un MNT.

Ces modèles 2D d'une part et 3D d'autre part peuvent être subdivisés en trois types, comme c'est le cas dans la pratique en Suisse:

- Modèles géométriques
- Modèles trajectographiques
- Modèles d'écoulement.

Le tableau 1 ci-dessous présente leur fonction et leurs domaines d'application.

<b>Type de modèle</b>	<b>Fonction</b>	<b>Détails</b>	<b>Remarques</b>
Modèles géométriques	Ces modèles décrivent une relation statistique entre la hauteur de chute et la distance d'arrêt. Ils se fondent sur le principe de la pente forfaitaire.	La littérature spécialisée décrit en détail les bases de ces modèles ainsi que les possibilités qu'ils offrent. On consultera notamment Volkwein et al. (2011) pour un aperçu.	Dans la pratique, les modèles géométriques sont utilisés aussi bien pour les chutes de pierres que pour les éboulements et les écroulements. Ils sont applicables tant à un profil de pente qu'à une analyse surfacique par le biais d'un MNT.
Modèles trajectographiques	Les trajectoires des différents blocs ainsi que les énergies, les fréquences de passage et les hauteurs de rebond sont calculées pour un profil de pente ou un MNT.	Volkwein et al. (2011) proposent un aperçu détaillé de ces modèles. Pour exécuter la simulation, il est nécessaire de définir les zones de production, les tailles des blocs représentatifs et les paramètres du terrain.	En Suisse, plusieurs de ces programmes de simulation des chutes sont utilisés. Rovina et al. (2011) les ont examinés plus en profondeur, en les comparant.
Modèles d'écoulement	Les modèles d'écoulement sont employés pour simuler les zones d'atteintes (ou portées) des grands éboulements et écroulements.		Étant donné que ces derniers phénomènes sont plutôt rares, il n'est pas aisé de calibrer les modèles pour des cas spécifiques. Toutefois, ces modèles permettent de représenter des scénarios optimistes et pessimistes.

Tableau 1 : Vue d'ensemble des types de modèles.

Le tableau 2 rassemble les différents types de modèles, en présentant leurs avantages et leurs inconvénients. Il fournit par ailleurs un aperçu des domaines d'application et des niveaux d'étude appropriés. Les publications de Rovina et al. (2011), de Volkwein et al. (2011) et de Gerber (2019) présentent de plus amples informations et bibliographies concernant les programmes de simulation de chutes les plus courants ainsi que sur les fonctions et les caractéristiques principales de tels programmes. Ces publications s'intéressent plus en détail à la physique du mouvement, aux méthodes de calcul, aux types de mouvements, aux processus de freinage, aux interactions entre les blocs et le sol ainsi qu'aux coefficients pour la paramétrisation des sols.

	Type de modèle*	Forces, avantages	Faiblesses, inconvénients	Niveau**
Chute de pierres et de blocs	MG (2D / 3D)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Application simple</li> <li>- Peu de paramètres nécessaires</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La topographie n'est prise en compte que de manière très limitée, donc seules des estimations grossières sont possibles quant à la zone de processus.</li> <li>- Il arrive souvent que la largeur de la zone de processus soit surestimée.</li> </ul>	1
	MT (2D)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Données statistiques sur les énergies, les hauteurs de rebond et les portées le long du profil</li> <li>- Effet protecteur de la forêt modélisé de façon réaliste</li> <li>- Possibilité de modéliser les grands blocs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Impossibilité de produire des données sur l'extension de la zone de processus, donc applicabilité limitée pour les topographies complexes.</li> </ul>	1
	MT (3D)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Données de surface sur les énergies, les hauteurs de rebond et les portées</li> <li>- Effet protecteur de la forêt modélisé de façon réaliste</li> <li>- Possibilité de modéliser les grands blocs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nécessité d'un MNT reproduisant au mieux la réalité avec une résolution &lt; 5 m.</li> <li>- Les obstacles et les ruptures de pentes (p. ex. digues existantes ou planifiées, traversées de routes) doivent être insérés correctement dans le MNT ou être traités de manière séparée afin d'éviter des effets de modélisation trompeurs.</li> </ul>	2 3
	ME (2D / 3D)	Rarement utilisés pour modéliser les chutes de pierres et de blocs et pas réellement appropriés		
Éboulement et écoulement	MG (2D / 3D)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Application simple</li> <li>- Peu de paramètres nécessaires</li> <li>- Données approximatives sur la portée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La topographie n'est prise en compte que de manière très limitée, donc seules des estimations grossières sont possibles quant à la zone de processus.</li> <li>- Il arrive souvent que la largeur de la zone de processus soit surestimée.</li> <li>- Possibilité d'obtenir des résultats approximatifs sur l'énergie, mais ceux-ci sont très conservateurs.</li> </ul>	1
	MT (2D)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Données statistiques sur les énergies, les hauteurs de rebond et les portées le long du profil</li> <li>- Effet protecteur de la forêt modélisé de façon réaliste</li> <li>- Possibilité de modéliser les grands blocs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Impossibilité de produire des résultats sur l'extension de la zone de processus, donc applicabilité limitée pour les topographies complexes.</li> <li>- Possibilité de simuler uniquement quelques blocs d'un écoulement (donc à utiliser avec prudence pour les processus de chute impliquant des processus de mobilisation extraordinaires dont les portées sont conséquentes).</li> </ul>	2 3
	MT (3D)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Données de surface sur les énergies, les hauteurs de rebond et les portées</li> <li>- Effet protecteur de la forêt modélisé de façon réaliste</li> <li>- Possibilité de modéliser les grands blocs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nécessité d'un MNT reproduisant au mieux la réalité avec une résolution &lt; 5 m.</li> <li>- Les obstacles et les ruptures de pentes (p. ex. digues existantes ou planifiées, traversées de routes) doivent être insérés correctement dans le MNT ou être traités de manière séparée afin d'éviter des effets de modélisation trompeurs.</li> <li>- Possibilité de simuler uniquement quelques blocs d'un écoulement (donc à utiliser avec prudence pour les processus de chute impliquant des processus de mobilisation extraordinaires dont les portées sont conséquentes).</li> </ul>	2 3
	ME (2D / 3D)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Résultats de modélisation proches de la réalité</li> <li>- Adapté pour l'analyse rétroactive d'événements</li> <li>- Possibilité de bien modéliser la gamme des scénarios possibles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Complexité de la paramétrisation et du calibrage.</li> <li>- Pour la 2D, impossibilité de produire des données sur l'extension de la zone de processus, donc applicabilité limitée pour les topographies complexes.</li> <li>- Difficile d'établir une prévision exacte.</li> </ul>	2 3

Tableau 2 : Domaines d'utilisation, avantages et limites des modèles de chute (adaptation de Dorren et al. 2012).

\* Type de modèle : MG = modèle géométrique ; MT = modèle trajectographique ; ME = modèle d'écoulement ; 2D / 3D = modèle bi- ou tridimensionnel

\*\* Niveau : niveau d'étude approprié (voir chapitre 3), soit 1 = carte indicative des dangers ; 2 = carte des dangers ; 3 = études de détail ainsi que planification et dimensionnement de mesures

**Précisions concernant la qualité des modèles trajectographiques et le rôle de l'utilisateur du modèle**

*Il existe peu d'études sur l'évaluation de la qualité des modèles. On ne dispose pas, pour les énergies, les vitesses, les hauteurs de rebond et les distances d'écoulement, de valeurs de mesure systématiques ni de données de modèle permettant d'effectuer des comparaisons, raison pour laquelle on ne sait guère si les résultats des modèles correspondent systématiquement à la réalité. Deux études sur le sujet (Labieuse 2004 ainsi que Berger et Dorren 2006) ont conclu qu'il est en principe possible de prédire les énergies, les hauteurs de rebond et les distances d'écoulement pour la majeure partie des différents blocs dans un processus de chute. Cela nécessite toutefois de bien calibrer les paramètres du modèle concerné. Cependant, pour les comparaisons concernées, les résultats des divers modèles présentaient une dispersion colossale et les valeurs de mesure pour les énergies et les hauteurs de rebond étaient parfois considérablement surestimées (jusqu'à 400 %, ou un facteur quatre). Pour l'article de Berger et Dorren (2006), les évaluateurs n'ont pas pu procéder à une plausibilisation, ce qui pourrait expliquer certaines erreurs. Neuf modèles différents ont été appliqués, dont trois par plusieurs participants. Les résultats montrent que deux utilisateurs différents d'un même modèle ont produit des résultats soit complètement faux (donc non plausibles) soit très précis (cohérents). Cela montre que le rôle de l'utilisateur du modèle est déterminant pour produire une simulation fiable (voir aussi Volkwein et al. 2011). Les deux études montrent par ailleurs que la modélisation permet plus facilement de déterminer les distances d'écoulement que de restituer précisément les hauteurs de rebond et les énergies. Autre conclusion : pour les modèles 2D, choisir les profils de pente pour une topographie complexe n'est pas une tâche aisée.*

*Il est possible de réduire les incertitudes susmentionnées en combinant deux modèles différents.*

**3. Niveaux d'étude**

Les exigences croissantes pour l'évaluation des dangers et des risques et pour la planification des mesures en la matière requièrent des simulations toujours plus performantes. L'aide à l'exécution de l'OFEV (2016) distingue les trois niveaux d'étude ou d'analyse ci-après.

- niveau 1: carte indicative des dangers (échelle sommaire, E1)
- niveau 2: carte des dangers (échelle moyenne, E2)
- niveau 3: études de détail ainsi que planification et dimensionnement de mesures (échelle fine, E3).

Les paragraphes qui suivent présentent ces trois niveaux de modélisation des processus de chute ainsi que les exigences générales de manière synthétique. Le chapitre 4 décrit ensuite le processus de travail recommandé articulé en six étapes. Le tableau 2 présente les domaines d'utilisation des divers types de modèles et les niveaux correspondants.

**Précisions concernant les niveaux d'étude**

*Les frontières entre les différents niveaux sont floues. La profondeur de l'analyse et les exigences relatives aux méthodes, aux paramètres de saisie et à l'interprétation doivent systématiquement être mises en regard des objectifs de l'évaluation et doivent être définies au cas par cas par les mandants et les spécialistes.*

**3.1 Carte indicative des dangers (échelle sommaire, E1)**

La carte indicative des dangers donne en principe un aperçu de l'occurrence spatiale des processus de chute (sources de processus potentielles et zones d'atteinte), sans indication des intensités et des probabilités d'occurrence. Établie à l'échelle du 1:10 000 au 1:50 000, cette carte couvre en général de grandes surfaces (région, canton).

Comme on souhaite obtenir une vue d'ensemble en utilisant un minimum de ressources, on emploie ici généralement des modèles et des données SIG. Des données topographiques et parfois également des géodonnées qui décrivent les caractéristiques du sol sont toutefois nécessaires sur l'ensemble du territoire concerné. Pour les modèles de terrain, une résolution grossière peut suffire (en principe de 5 à 10 m). Au niveau E1, ce sont souvent les modèles géométriques qui sont utilisés (p. ex. les méthodes de la pente forfaitaire, cf. tableau 2). On utilise également les modèles trajectographiques 3D, mais en simplifiant largement et en généralisant les paramètres de saisie. La simulation peut se faire avec ou sans forêt; en général, on ne tient pas compte de la forêt, car on vise une représentation plutôt conservatrice.

Pour établir des cartes indicatives, on suppose le plus souvent des scénarios de chute simplifiés et homogènes sur de larges zones tel un scénario unique avec des corps de 1 m<sup>3</sup>. Le cas échéant, il est

possible d'élaborer des cartes avec différentes tailles de blocs pour étudier la sensibilité dans les zones de dépôt.

On procède à une validation grossière à l'aide du cadastre des événements et des témoins muets.

### **3.2 Carte des dangers (échelle moyenne, E2)**

La carte des dangers doit subdiviser aussi précisément que possible le périmètre étudié en degrés de danger. Cette carte est généralement établie à l'échelle du 1:2000 au 1:10 000. Le degré de détail est plus élevé que pour la carte E1. En d'autres termes, cette carte est plus proche de la réalité et plus précise spatialement. Les scénarios et les paramètres de saisie doivent être déterminés en détail sur le terrain. Les cartes de danger et le rapport technique y afférent contiennent des informations complètes sur les trajectoires, l'extension spatiale, les intensités et les probabilités d'occurrence des processus de chute potentiels.

### **3.3 Étude de détail et planification de mesures (échelle fine, E3)**

Généralement établie à l'échelle du 1:1000 au 1:5000, une étude de détail peut être réalisée pour planifier et dimensionner des mesures (mesures de protection des surfaces ou des objets) ou pour une situation dangereuse spécifique. De telles études ainsi que les situations où des processus complexes sont en jeu (p. ex. plusieurs sources de processus avec chevauchement des zones de dépôt, fragmentation extraordinaire) requièrent un traitement approfondi et donc une charge de travail accrue par rapport à l'élaboration d'une carte des dangers. Par conséquent, cette échelle E3 suppose au minimum les mêmes exigences que celles du niveau E2.

Pour la modélisation 3D des chutes, il est important d'utiliser un modèle de terrain élaboré correctement (soit un modèle qui représente « correctement » la topographie du lieu), avec un maillage en principe de 2 à 5 m (p. ex. swissALTI3D). Il y a lieu de vérifier la qualité des données brutes des modèles de terrain et de compléter ces données si nécessaire. Les paramètres d'entrée tels que les caractéristiques du sol (amortissement et rugosité), l'état de la forêt, les géométries des ruptures de pentes extraordinaires ou les ouvrages de protection tels que les filets et les digues notamment doivent être relevés sur le terrain de manière encore plus détaillée que pour l'échelle E2, puis représentés correctement dans le modèle.

Avec des résultats bons sur le plan qualitatif et une densité de données suffisamment élevée pour le MNT, il est possible d'étudier l'efficacité des ouvrages de protection. On peut par exemple modéliser l'efficacité et les effets d'une digue planifiée sur les dangers en question (nombre de blocs pouvant être arrêtés et nombre franchissant l'ouvrage). Les résultats des simulations permettent d'optimiser des mesures (site, géométrie et capacité d'absorption) et de contribuer à leur dimensionnement. Il faut veiller à identifier et écarter d'éventuels artefacts, car ceux-ci peuvent engendrer des effets de rebond qui n'existent pas en réalité. Cela peut notamment être le cas lorsque le MNT présente une très haute résolution ( $\leq 1$  m) et que les mesures de protection ne sont pas intégrées comme il se doit au modèle de terrain ou à la topographie locale. Une haute résolution peut aussi entraîner une redondance des paramètres de rugosité le cas échéant.

La simulation doit être réalisée avec la forêt et les ouvrages de protection existants pour autant que l'efficacité de ces ouvrages soit considérée pertinente. Des analyses de sensibilité sur les paramètres de modélisation permettent par ailleurs de tirer des conclusions sur les incertitudes des modèles.

## **4. Étapes d'évaluation des dangers de chutes basée sur des modèles**

La qualité des simulations dépend directement de la qualité des grandeurs de départ et de l'expérience de la personne qui modélise. À elle seule, la simulation n'est pas suffisante pour émettre une évaluation représentative et fiable des dangers de chute et des risques engendrés. Elle s'insère dans un cadre plus large : celui de l'évaluation du danger, pour laquelle elle constitue un outil.

Le processus de travail recommandé s'articule en six étapes distinctes. Ces étapes doivent être suivies scrupuleusement, en particulier à l'échelle « carte des dangers » (E2) et « étude de détail » (E3). Pour l'échelle « carte indicative » (E1), on utilise plutôt des données brutes et on peut se permettre de sauter certaines étapes ou de les aborder de manière simplifiée (cf. également point 3.1). Une transparence



totale est garantie uniquement dans la mesure où le rapport technique présente, pas à pas, en garantissant la traçabilité, quelles bases, hypothèses et réflexions mènent aux résultats représentés.

Les six étapes du processus de travail sont (cf. également Rovina et al. 2011 et Dorren et al. 2012) :

1. Travaux préparatoires (y compris relevés sur le terrain)
2. Définition des scénarios
3. Simulation de chutes
4. Calibrage et plausibilisation des résultats des modèles
5. Détermination de la portée, des énergies et des hauteurs de rebond
6. Élaboration des cartes des intensités et des dangers

La modélisation et la simulation des processus de chute n'interviennent pas de manière identique dans les différentes étapes de l'évaluation des dangers de chute. Ainsi, les étapes 1 et 2 rassemblent les bases nécessaires à la simulation. Les étapes 3, 4 et 5 sont directement liées à l'exécution des simulations, tandis que l'étape 6 valorise les résultats des simulations.

#### 4.1 Travaux préparatoires (étape 1)

Dédiés principalement à la constitution des données de bases, les travaux préparatoires consistent à réaliser les tâches figurant dans le tableau ci-dessous.

<b>Tâche</b>	<b>Signification et but</b>	<b>Moyens, observation, paramètres</b>	<b>Commentaires</b>
Évaluation des événements historiques	Ces événements donnent un premier aperçu de l'ampleur et de la fréquence des événements de chute sur le site concerné.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cadastre des événements</li> <li>- Cartes historiques (cartes Siegfried et Dufour notamment)</li> <li>- Photos aériennes</li> <li>- Archives cantonales et communales</li> <li>- Évaluations des dangers de chute existantes</li> <li>- Sondage auprès des habitants de la région et des experts (car ceux-ci connaissent souvent bien les événements de chute récents et fréquents)</li> </ul>	<p>Toutes les données récoltées doivent être évaluées, synthétisées et faire l'objet d'une analyse de plausibilité.</p> <p>S'il manque des données sur le site concerné, des informations sur les pentes voisines présentant des caractéristiques similaires peuvent être utiles (p. ex. géologie, topographie et caractéristiques du sol). Cependant, de telles extrapolations entraînent des niveaux d'incertitude élevés.</p> <p>Les offices des ponts et chaussées et les sociétés ferroviaires tiennent parfois des cadastres spécifiques, car l'exploitation peut être entravée par des événements touchant les infrastructures. Il faut cependant noter qu'il n'est pas rare que ces cadastres ne couvrent pas les événements de chute de faible ampleur.</p>
Description et cartographie de terrain pour le secteur d'étude	L'objectif est de caractériser les zones de production, de transit et de dépôt et de documenter les mesures de protection existantes ainsi que les peuplements forestiers.	<p>Dans la zone de production :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- analyse des caractéristiques géomorphologiques, hydrogéologiques et de géologie structurale (lithologie, propriétés géomécaniques, altération, surfaces de discontinuité, stabilité rocheuse, traces de ruptures fraîches dans la paroi rocheuse, etc. ; cf. notamment la revue dans Volkwein et al. 2011)</li> </ul> <p>Dans les zones de transit et de dépôt :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- relevé des caractéristiques du sol (amortissement et rugosité)</li> <li>- relevé des propriétés des forêts</li> </ul>	<p>Les critères pertinents pour l'évaluation de l'<u>effet protecteur de la forêt</u> sont en particulier le nombre de troncs, la composition des essences d'arbres, la répartition des diamètres ainsi que la répartition spatiale des différents peuplements forestiers et les trouées dans les peuplements forestiers. Les données issues de relevés scanner permettent une saisie automatique de la forêt et en partie des données relatives aux troncs (p. ex. répartition, densités, diamètres).</p> <p>Tous les <u>ouvrages de protection</u> disponibles sont relevés (filets, digues, ancrages, filets plaqués, palissades/grillages, galeries, etc.). Leur influence sur le déroulement des processus et leur efficacité sont évaluées (cf. projet « PROTECT » ; Romang 2008). Il faut pour ce faire tenir compte de la position géographique, du type d'ouvrage et de la capacité d'absorption énergétique réelle estimée,</p>

		<p>Dans la zone de processus de manière générale :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- caractérisation de toutes les mesures de protection possibles (comparaison avec le cadastre des ouvrages de protection)</li> </ul> <p>(voir point 4.3 pour plus de détails concernant les paramètres des modèles)</p>	<p>des dimensions des ouvrages ainsi que du cadastre des ouvrages de protection.</p> <p>Les <u>ouvrages d'art</u> (tels que murs en béton ou glissières de sécurité routière) peuvent également exercer une influence significative sur les processus de chute. Ces paramètres doivent être pris en compte sur la base d'une évaluation réalisée par un expert.</p> <p>Concernant les <u>bâtiments existants</u>, il est recommandé de procéder comme suit : ceux-ci doivent être ignorés lors de l'élaboration d'une carte indicative des dangers, car on souhaite en principe obtenir une représentation conservatrice. Il en va de même pour l'élaboration d'une carte des dangers, qui sert principalement d'instrument d'aménagement du territoire à long terme. Une analyse des risques permet par contre une bonne prise en compte des bâtiments existants. Finalement, la marche à suivre doit être définie conjointement par le mandant et le mandataire.</p>
Élaboration d'une carte des phénomènes (cf. également OFEV 2016)	Le relevé des zones de rupture, des témoins muets et des caractéristiques morphologiques sert à identifier et à estimer les sources et les types de dangers possibles (prédisposition et mode d'action). Il renseigne sur l'étendue actuelle du processus et des zones d'impact.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identification et délimitation des zones et sites de rupture primaires et secondaires (remobilisation), avec évaluation de l'activité</li> <li>- Grosseur, forme, position et « fraîcheur » des pierres et des blocs de la zone de dépôt</li> <li>- Traces de chutes de pierres</li> <li>- Impacts au sol et en hauteur, par exemple par un relevé des blessures sur les troncs</li> <li>- Couloirs sans arbres</li> </ul>	Conjointement à l'élaboration d'une carte des phénomènes, on peut procéder à une cartographie des paramètres de sol pour la modélisation.
Récolte des données du modèle	Récolte, élaboration et préparation des données nécessaires à la simulation.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Génération d'un profil de pente</li> <li>- Génération et vérification du modèle numérique de terrain (MNT)</li> <li>- Attribution des paramètres requis par le modèle aux polygones ou aux cellules de la trame (pour les modèles continus dans l'espace), ou aux segments de pente (pour les modèles fondés sur des profils)</li> </ul>	Il y a lieu de vérifier au préalable la précision et la qualité du MNT. La résolution du MNT ou du profil de pente (outre l'emplacement et le nombre de profils de pente) influe considérablement sur les résultats des modèles. De manière générale, pour une carte indicative (échelle E1), il est approprié d'opter pour une résolution de 5 à 10 m pour le MNT. Pour les échelles E2 et E3, la résolution devrait être de 5 m au plus.

Tableau 3 : Aperçu des tâches à réaliser dans le cadre des travaux préparatoires (adaptation de Dorren et al. 2012).

**Précisions concernant les travaux préparatoires**

*La quantité d'énergie investie pour l'acquisition des données de base, le travail sur le terrain ou l'analyse des géodonnées influence directement la qualité et la précision des résultats de la modélisation. Le degré de détail des données de base doit être suffisant pour le niveau d'analyse choisi. La charge de travail augmente proportionnellement au degré de détail.*

**4.2 Définition des scénarios (étape 2)**

L'étape de définition des scénarios consiste à définir précisément les événements de chute auxquels on peut s'attendre. Elle détermine la taille des blocs, les volumes des composantes rocheuses, le nombre de blocs, mais aussi la probabilité ou la période de retour d'un scénario. Les scénarios se fondent sur les observations et les données de base décrites au point 4.1. En principe, ils sont élaborés par un spécialiste des dangers naturels avant d'être approuvés par le mandataire. Dans l'évaluation des dangers, on distingue en général les scénarios de rupture d'une part et les scénarios d'occurrence d'autre part (voir les définitions dans Steffen et al. 2021). Les scénarios de rupture sont décrits à la

source des processus et associés à une probabilité de rupture (ou à une période de retour). Les scénarios d'occurrence sont quant à eux déterminés à l'emplacement du potentiel de dommage ; ils sont définis avec une probabilité d'occurrence (ou une période de retour) au moyen de modélisations et de l'analyse des événements.

### *Scénario de rupture*

Il s'agit ici avant tout de procéder à une analyse globale détaillée des surfaces de discontinuité dans la zone de rupture potentielle. Une telle analyse révèle le volume et la forme approximative des corps mobilisables ainsi que le nombre de blocs auquel il faut s'attendre en cas de rupture. Au sein d'une même zone de rupture, les conditions, comme l'agencement structural ou le degré de rupture, peuvent varier. C'est pourquoi il est souvent nécessaire de définir des zones de rupture distinctes, plus petites.

Le défi dans la définition d'un scénario de rupture consiste à déterminer la probabilité de rupture. La recherche a développé pour ce faire différentes méthodes fondées sur la distribution selon la loi de puissance (voir p. ex. Corominas et al. 2017 ou Hantz et al. 2020) ou sur la datation des blessures sur les arbres en aval des parois rocheuses ; à ce jour, ces méthodes ont rarement été mises en œuvre. Pour appliquer les distributions selon la loi de puissance, il faut tenir compte du fait que la taille maximale possible des blocs dépend de la prédisposition géologique et donc qu'il existe une limite supérieure.

### *Scénario d'occurrence*

Un scénario d'occurrence décrit le volume, la forme globale (carré, rond, etc.) et le nombre de composantes tombées qui atteignent le potentiel de dommage et peuvent possiblement engendrer des dégâts sur le site concerné. Une probabilité d'occurrence doit être attribuée à chaque scénario d'occurrence. Elle se calcule sur la base de la probabilité de rupture (issue de l'évaluation géologique) et de la probabilité d'atteinte (issue de la documentation des événements ou de la modélisation).

Il faut tenir compte, dans l'évaluation, d'une éventuelle fragmentation des corps rocheux lors du premier impact avec le sol ou dans la zone de transit. Il n'est en principe pas possible de modéliser la fragmentation directement. Le spécialiste définit des blocs de référence représentatifs pour un scénario de rupture spécifique, qui peuvent ensuite être pris comme volumes initiaux dans la simulation (voir encadré *Précisions concernant la fragmentation* au point 4.3).

La documentation des événements et l'analyse des composantes dans les zones de transit et de dépôt (témoins muets) ainsi que la distinction stricte entre les composantes jeunes et plus anciennes constituent d'importantes bases pour l'évaluation des caractéristiques des blocs et des probabilités d'atteinte et de dépôt (p. ex. sur le site de l'objet exposé). Cependant, la documentation des événements n'est jamais exhaustive, sachant que certains événements (en particulier les plus anciens) n'y apparaissent pas. Par ailleurs, de nombreux événements se déroulent en dehors des zones habitées ou ne causent aucun dégât et ne sont ainsi pas recensés. Par conséquent, il est souvent impossible ou irréaliste d'effectuer des déductions statistiques sur plusieurs siècles concernant la taille des blocs, raison pour laquelle il est nécessaire que les processus de chute rares, très rares ou extrêmes fassent l'objet d'une évaluation par des experts. Si la quantité de données est suffisante (cadastre, témoins muets), les méthodes statistiques constituent d'autres instruments utiles pour évaluer la probabilité d'occurrence (p. ex. « magnitude-frequency relationship », voir aussi Corominas et al. 2017 et Hantz et al. 2020).

**Précisions concernant la probabilité d'occurrence**

Les probabilités d'occurrences pertinentes doivent être définies en fonction de la problématique posée.

- Pour les cartes indicatives des dangers (E1), on ne définit en principe aucune probabilité d'occurrence, ou alors une probabilité qui se situe dans un intervalle de  $0,01 \text{ an}^{-1}$  à  $0,003 \text{ an}^{-1}$ .
- Pour les cartes des dangers (E2), on procède comme pour les périodes de retour des crues et des processus d'avalanche (30, 100, 300, > 300 ans ; p. ex. OFEV 2016), en définissant les probabilités d'occurrence suivantes : 0,033, 0,01, 0,003, < 0,003  $\text{an}^{-1}$ .
- Pour les études de détail (E3) ou pour les voies de communication et les installations pour lesquelles la disponibilité joue un rôle essentiel, on étudie souvent les événements très fréquents (périodes de retour de 1, 2, 5 ou 10 ans). Ces scénarios sont d'une importance capitale pour les analyses de risque concernées, car ils constituent le plus souvent une part importante du risque total.

**4.3 Simulation de chutes (étape 3)**

Les différents programmes (2D, 3D) présentent chacun des exigences spécifiques quant aux données de base et aux paramètres physiques. Il convient de cartographier les facteurs d'influence locaux avec un degré de précision suffisant pour ensuite déduire les paramètres de simulation spécifiques en fonction du modèle concerné (voir également Rovina et al. 2011). La détermination réaliste des paramètres ci-après doit s'appuyer sur des relevés de terrain effectués avec minutie.

*Paramètres du sol pertinents*

Les paramètres du sol pertinents sont les paramètres utilisés par un modèle pour la dissipation de l'énergie des blocs lors de l'impact au sol. Ils doivent être différenciés et quantifiés en fonction de la présence et de l'épaisseur de matériaux de couverture meubles et du type de sol, sur la base de la cartographie de terrain. Le degré de détail est donné par la résolution spatiale du NMT choisi.

L'objectif est par exemple de pouvoir tenir compte du comportement suivant. Lorsqu'un bloc de grande taille chute sur de petites pierres proches les unes des autres (éboulis fins), son énergie se voit considérablement réduite. Cependant, si ce même bloc tombe sur un bloc d'une taille bien plus importante, on assiste alors à une réaction de contact avec un substrat rocheux : en raison du faible amortissement, la dissipation d'énergie est minimale ; le bloc peut par ailleurs être fortement dévié ou fragmenté (voir aussi l'encadré sur la fragmentation).

La configuration de tous les paramètres du sol pertinents doit être effectuée de manière spécifique pour chaque programme. Selon le modèle, ces paramètres décrivent les coefficients de friction statique (adhérence) et dynamique (cinétique), les coefficients de restitution, la rugosité de la surface, l'élasticité du sol, la résistance à la pénétration, etc.

*Effet protecteur de la forêt*

Les forêts de protection représentent la meilleure mesure de protection biologique contre les chutes de pierres. À travers des impacts sur des arbres couchés au sol ou sur pied, elles sont en mesure de freiner, de dévier, voire d'arrêter les pierres et les blocs en mouvement. Ainsi, sur de nombreux sites, ces forêts permettent de réduire les risques liés aux chutes de pierres à un niveau acceptable. L'effet barrière d'une forêt sera suffisant ou non en fonction de l'énergie cinétique des pierres en mouvement et de la quantité de bois disponible, ainsi que de la capacité de ce dernier à dissiper l'énergie dans les secteurs forestiers traversés. Par exemple, un épicéa dont le diamètre à hauteur de poitrine vaut 45 cm pourra absorber une énergie d'environ 250 kJ s'il est impacté de manière frontale à une hauteur de 1,3 m. Pour un hêtre, cette valeur serait approximativement de 400 kJ (Dorren et Berger 2005). La quantité de bois est déterminée en fonction du nombre d'individus, de la répartition des diamètres des arbres et de la longueur de la pente boisée entre la zone de production des chutes de pierre et le potentiel de dommages (voir l'aide à l'exécution *Gestion durable des forêts de protection – Nais* Frehner et al. 2005 et les profils d'exigence). L'outil Nais « Chutes de pierres », disponible en ligne, donne une première estimation quantitative du degré de protection offert par une forêt (voir : <http://www.gebirgswald.ch/fr/steinschlag-tool.html>).

L'effet barrière d'une forêt sur les chutes de pierres peut et doit être modélisé à l'élaboration d'une carte des dangers ainsi que pour les études de détail, pour la planification de mesures et les analyses de

risques. Dans le cas d'une carte indicative des dangers, il est également tout à fait possible de prendre en compte l'effet protecteur de la forêt, mais ce point doit être discuté avec le mandant.

La forêt peut être prise en compte de différentes manières selon le programme utilisé.

- Prise en compte directe : le freinage dû à la forêt s'intègre à la simulation via le nombre d'arbres ou la densité du peuplement, le diamètre des individus et en partie les essences concernées. Seuls de rares programmes permettent de saisir les arbres individuellement (position, diamètre et essence). Il est important ici de cartographier correctement les couloirs non boisés qui peuvent être identifiés uniquement sur le terrain et de les modéliser comme des surfaces sans forêt.
- Prise en compte indirecte : l'effet protecteur de la forêt est défini et approximé de façon experte par le biais des paramètres du sol.

### *Ouvrages de protection*

En principe, les ouvrages peuvent être saisis comme des irrégularités de la surface du terrain. Ils peuvent être représentés par l'intermédiaire de propriétés du sol modifiées ponctuellement ou d'un MNT adapté manuellement dans le modèle. Si l'adaptation manuelle du MNT est indiquée en particulier dans le cas des digues de protection, elle est grevée de certaines difficultés d'application (voir la fiche d'information « Erfahrungen und Hinweise zur Projektierung von Steinschlagschutzdämmen », OFEV 2022, en préparation).

Dans certains programmes, il est possible de saisir directement des écrans (p. ex. des filets de protection) en définissant leur emplacement, leur hauteur, leur angle et leur capacité d'absorption énergétique. Dans les programmes de simulation 2D, il est très facile de saisir des topographies de terrain modifiées, avec les ruptures de pentes correspondantes sans lissage par le biais du tramage.

#### **Précisions concernant la fragmentation**

*S'il est probable que la masse en mouvement initiale soit fragmentée durant l'événement (cf. p. ex. Corominas et al. 2017), il faut se poser la question de la taille des blocs pour la simulation. Réaliser une simulation avec une taille de bloc correspondant à la taille à la source entraîne des résultats pessimistes (énergies trop élevées et distances d'écoulement trop longues). À l'inverse, réaliser une simulation avec des tailles de bloc correspondant à celles observées dans la zone de dépôt engendre des résultats trop optimistes (énergies trop faibles et portées réduites). Dans l'idéal, il faudrait réaliser la simulation avec le bloc source dans la partie supérieure de la trajectoire de chute, puis avec des tailles de bloc toujours plus petites pour les parties inférieures de la trajectoire (jusqu'aux tailles de bloc observées dans la zone de dépôt). Comme il n'est pas possible de prendre en compte un tel déroulement dans un modèle, il y a lieu de simuler les volumes différents et maximaux des blocs individuels après fragmentation. Dans ce contexte, l'étendue des dépôts pour les plus petits volumes est en général plutôt sous-estimée.*

#### **Précisions concernant la sensibilité**

*Il est toujours expressément recommandé de calculer systématiquement le même scénario en variant les paramètres du modèle (y compris différentes résolutions du MNT) ou avec un autre modèle de simulation. Cela permet d'estimer la sensibilité des paramètres de modélisation pour les résultats des simulations. On peut ensuite, sur le terrain, étudier et documenter plus en détail les paramètres les plus sensibles afin de limiter les incertitudes et d'améliorer la pertinence de la modélisation.*

*Il est avantageux, à titre de comparaison, d'estimer les énergies et les hauteurs de rebond attendues à l'aide d'un calcul approximatif. Les publications de Rovina et al. (2011) et de Gerber (2019) contiennent davantage d'informations à ce sujet.*

#### **Précisions concernant le dimensionnement des ouvrages de protection**

*Selon le modèle et le mode de représentation du bloc (point de masse, cercle ou forme effective 3D du bloc), l'utilisateur doit interpréter les hauteurs de rebond simulées. Par exemple, dans le cas d'une hauteur de rebond de 2,8 m d'un point de masse avec un rayon de bloc de 0,6 m, un filet d'une hauteur de 3 m serait insuffisant, car le bord supérieur du bloc se situerait alors à 3,4 m et qu'il est très probable que le bloc, du fait de son énergie de rotation, passe par-dessus le filet. On peut en partie intégrer les filets dans les modèles de simulation. Il faut cependant faire attention à la manière dont les paramètres déterminants des filets sont pris en compte (p. ex. hauteur du filet mesurée verticalement ou perpendiculairement à la pente, ou capacité d'absorption énergétique).*

*Toutes les simulations sont des simulations pour des blocs individuels. Lors d'un événement, il est possible (selon les scénarios de rupture et la fragmentation) que plusieurs blocs impactent un filet ou une digue les uns après les autres ou de manière groupée. Il faut également tenir compte de cette possibilité lors du dimensionnement.*

#### 4.4 Calibrage et plausibilisation des résultats des modèles (étape 4)

##### *Calibrage*

Dans l'idéal, il faudrait réaliser une première simulation de chute pour un scénario ou un événement observé sur le terrain. Les paramètres de saisie sont adaptés dans des intervalles réalistes jusqu'à ce que les résultats du modèle correspondent au mieux aux observations effectuées sur le terrain (calibrage). Comparaisons possibles : hauteurs de rebond simulées avec blessures sur les arbres ou portées simulées avec blocs déposés (selon carte des phénomènes et témoins muets). Lors du calibrage, il est recommandé de faire varier le moins possible les paramètres. Dès que les résultats des calculs représentent de manière réaliste les faits observés sur le terrain, on considère que la représentation du processus de chute est fiable pour le scénario choisi, qui servira de base pour modéliser les autres scénarios définis. Si la grandeur de bloc simulée change considérablement dans les autres scénarios (p. ex. de 0,2 m<sup>3</sup> à 2 m<sup>3</sup>), il peut être nécessaire d'adapter les paramètres du sol.

##### *Plausibilisation*

Les résultats des scénarios simulés (en particulier la propagation, les portées et les hauteurs de rebond) doivent toujours être plausibilisés à l'aide des événements documentés, des données de terrain (témoins muets), des trajectoires observées et/ou de la méthode de la pente forfaitaire (Rovina et al. 2011 ; Gerber 2019). Les chutes de pierres et de blocs dont la pente forfaitaire est inférieure à 26° doivent être remises en question. Il faut par ailleurs vérifier les résultats de la simulation sur le terrain, par exemple en effectuant des visites des sites critiques et en examinant si la zone de dépôt présente des obstacles et des constructions qui pourraient influencer sur le processus. Les écarts entre les résultats de simulation et les observations de terrain peuvent découler d'hypothèses inappropriées, du choix des paramètres ou des données d'entrée. Les points suivants notamment sont critiques : délimitation des zones de production, hauteurs de chute initiales, tailles et formes de blocs, résolution du MNT, paramètres du sol, effets des mesures de protection techniques et biologiques, nombre de simulations, etc. Dans ce cas, il y a lieu de réaliser de nouvelles modélisations avec des données d'entrée et des paramètres adaptés. S'il n'est pas possible de limiter les divergences, il faut expliquer et justifier les écarts restants.

#### 4.5 Détermination de la portée, des énergies et des hauteurs de rebond (étape 5)

Il est ensuite possible de déterminer les portées réalistes maximales ainsi que les surfaces enveloppes des scénarios de chute modélisés. La probabilité d'atteinte est en principe utilisée comme base. Il s'agit de simuler un nombre suffisamment élevé de blocs dans la zone de production. Les portées les plus extrêmes peuvent ensuite être catégorisées comme improbables : les portées réalistes maximales sont ainsi fixées en excluant les données aberrantes ou les déroulements extrêmes d'événements. Les cas aberrants peuvent par exemple être des blocs individuels dont l'arrêt a été modélisé à une très grande distance ou dont la trajectoire présente des déflexions extrêmes. Cette interprétation nécessaire doit tenir compte des conditions spécifiques au site, par exemple des éléments topographiques et/ou constructifs. Finalement, on peut définir une surface comme zone de dépôt pour une probabilité d'occurrence donnée. Il convient de noter que le nombre suffisamment élevé de blocs à simuler est défini par le nombre minimal de passages requis dans la partie inférieure de la zone de dépôt fixée. Il faut garantir un nombre de passages minimal de 20 ou 30 sur l'ensemble de la zone de dépôt retenue afin de disposer d'assez d'observations pour la définition de l'énergie et des hauteurs de rebond.

Il y a lieu de définir ensuite, à l'intérieur de cette zone, les intensités (faible, moyenne ou forte). Cette procédure est répétée pour chaque scénario. Dans la pratique, en fonction du type et de la physique du modèle, ce sont en principe des intervalles de confiance de 90 % à 98 % qui sont utilisés pour la fonction densité de probabilité des énergies et des hauteurs de rebond (cf. également Rovina et al. 2011). La valeur varie, car les modèles utilisent différentes méthodes de calcul. Généralement, 2 % à 10 % des résultats sont considérés comme des aberrations potentielles ou des scénarios extrêmes. Les experts doivent travailler avec le mandant et les autorités de surveillance pour fixer et documenter les plages de valeur pertinentes pour l'évaluation des dangers. Cette approche peut très bien être utilisée également pour déterminer les portées réalistes maximales sur la base de la probabilité d'atteinte. Lors de l'élaboration de cartes des dangers, il est possible d'employer des portées extrêmes comme argument pour délimiter une zone de danger résiduel, d'autant plus si de fortes intensités de chute sont simulées.

**Précisions concernant la traçabilité**

*Il revient aux experts de fixer la portée et les énergies (et les hauteurs de rebond). Pour des raisons de traçabilité, les hypothèses et les décisions retenues doivent être documentées et justifiées en détail et sans équivoque dans le rapport technique.*

**Précisions concernant les statistiques**

- *En raison de la dispersion des blocs chutant sur les cônes d'éboulis, les simulations 3D nécessitent, pour générer une statistique fiable, un nombre bien plus élevé de simulations que les modélisations 2D.*
- *Étant donné que les surfaces enveloppes (portées) reposent sur une interprétation, il n'est pas possible d'indiquer une valeur limite valable de manière générale pour la probabilité d'atteinte pertinente. Les experts doivent travailler avec le mandant et les autorités de surveillance pour fixer et documenter cette valeur.*
- *Les ouvrages de protection potentiels se situent souvent loin dans la zone de dépôt, où parfois seules quelques trajectoires sont disponibles. Pour qu'un 95<sup>e</sup> percentile puisse être pertinent pour la planification de mesures, il faut disposer d'un nombre suffisant de passages (100 au minimum ; cf. notamment Lambert et al. 2013).*
- *D'autres données détaillées sur les statistiques figurent dans Rovina et al. (2011).*

**Précisions concernant la hauteur de rebond effective**

*La manière dont la hauteur de rebond est rendue peut varier selon le programme : perpendiculaire à la surface de terrain ou verticale. Le point de référence utilisé pour mesurer la hauteur peut lui aussi varier : centre du bloc, ou point le plus haut ou le plus bas du bloc. Il faut en tenir compte dans le dimensionnement des ouvrages de protection.*

**4.6 Élaboration des cartes des intensités et des dangers (étape 6)**

Selon le cahier des charges et l'échelle de traitement (E2, E3 ; cf. chapitre 3), les cartes d'intensité sont élaborées (en principe par source de processus ou zone de production), avec ou sans carte des dangers dérivée.

Les classes d'intensité utilisées pour les cartes d'intensité sont dérivées des énergies (voir OFEV 2016). Des cartes d'intensité sont élaborées aux niveaux E2 et E3 pour toutes les probabilités d'occurrence définies (ou périodes de retour, cf. point 4.2). Aucune carte d'intensité n'est réalisée pour le niveau E1 (voir point 3.1). Les résultats des simulations des processus de chute issus de l'étape 5 (point 4.5) doivent faire l'objet d'une vérification et d'une évaluation critique qui tiennent compte de toutes les données de base, des conditions du terrain ainsi que des incertitudes liées au programme et aux données d'entrée. Les surfaces enveloppes et les limites d'intensité découlent d'une interprétation et d'une évaluation manuelle par les experts, qui impliquent d'arrondir dans une certaine mesure les contours et d'atténuer les artefacts potentiels. Une telle interprétation requiert beaucoup d'expérience et représente un défi particulier dans la procédure d'évaluation des dangers de chute.

On peut ensuite, sur la base des cartes d'intensité et à l'aide du diagramme intensité-probabilité, dériver la carte des dangers (voir fig. 8 dans OFEV 2016).

**5. Incertitudes et traçabilité**

Le recensement et l'évaluation des processus de chute sont entachés d'incertitudes. Plus celles-ci sont importantes, plus la marge d'interprétation est élevée. Une marge d'appréciation existe ainsi et il appartient à la personne mandatée de l'exploiter à bon escient. Les modélisations contribuent à cette marge d'appréciation, notamment en raison des spécificités de chaque programme. Les incertitudes et les imprécisions apparaissent en particulier dans les domaines suivants (Rovina et al. 2011 fournissent des explications complémentaires) :

- identification des sites de rupture potentiels ;
- définition des scénarios, en particulier en lien avec la probabilité de rupture ;
- sélection d'une ou de plusieurs trajectoires représentatives pour les simulations des processus de chute en 2D ;
- acquisition du profil de pente et des formes de terrain, conforme à la réalité et adaptée au modèle ;

- paramètres d'entrée (facteurs de freinage propres du terrain et de la forêt, généralisations ou standardisations liées au programme utilisé) ;
- contraintes liées au programme (p. ex. transition entre rebondir et rouler, critères d'arrêt).

L'expert chargé des modélisations des processus de chute doit être en mesure d'expliquer au mandant les conséquences des incertitudes sur les résultats.

À l'instar des exigences de précision, le rapport technique doit aussi mentionner de manière claire et transparente les données de base, les réflexions, les hypothèses et les accords sous-jacents aux modélisations des processus de chute, à l'évaluation des dangers ou au dimensionnement d'une mesure de protection.

## 6. Synthèse

L'évaluation des dangers de chutes de pierres utilise différents modèles 2D et 3D, parfois très différents les uns des autres. La façon dont est conduite une modélisation des processus de chute doit être adaptée à la problématique, au niveau de l'évaluation (E1, E2 ou E3) et aux ressources temporelles et financières.

La modélisation des processus de chute ne suffit pas à elle seule pour effectuer une évaluation des dangers aux niveaux E2 et E3. Toutes les étapes du processus de travail (points 4.1 à 4.6) doivent être réalisées. Les observations et les mesures de terrain revêtent une grande importance dans l'évaluation des dangers. Le rôle de l'utilisateur du modèle et son expérience avec le modèle, que ce soit dans la définition des données d'entrée ou dans la plausibilisation des résultats, est déterminant pour la qualité de l'évaluation.

L'objectif est que le rapport technique présente de manière claire et transparente quelles bases et quelles hypothèses ont conduit aux résultats représentés. Celui-ci doit contenir, expliquer et justifier les éléments suivants : un résumé des études existantes, une liste des événements historiques, les observations de terrain, les scénarios définis, les hypothèses sous-jacentes, les paramètres d'entrée, les résultats modélisés, les réflexions concernant leur plausibilisation et la détermination des portées ainsi que l'élaboration des cartes des intensités. C'est le seul moyen de garantir la traçabilité de l'évaluation des dangers de chute.



## Sources utilisées et citées

Les références **indiquées en gras** contiennent des bibliographies particulièrement fournies sur le sujet. Par conséquent, la présente fiche d'information renonce à indiquer d'autres références bibliographiques.

Berger F., Dorren L.K.A. 2006 : Objective comparison of rockfall models using real size experimental data. Disaster mitigation of debris flows, slope failures and landslides, Universal Academy Press, Inc., Tokyo, Japan, 245-252.

**Corominas J., Mavrouli O., Ruiz-Carulla R. 2017** : Rockfall occurrence and fragmentation. In : Advancing culture of living with landslides. Springer, 75-97.

**Dorren L., Berger F. 2005** : Stem breakage of trees and energy dissipation during rockfall impacts. Tree Physiology 26, 63-71.

**Dorren L., Loup B., Raetz H. 2012** : Einsatz von Modellen in der Schweizer Sturzgefahrenbeurteilung. Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz 169, 256-267.

Frehner M., Wasser B., Schwitler R. 2005 : Gestion durable des forêts de protection. Soins sylvicoles et contrôle des résultats : instructions pratiques. (L'environnement pratique). Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Berne, 564 p.

Gerber W. 2019 : Naturgefahr Steinschlag – Erfahrungen und Erkenntnisse. WSL Ber. 74. 149 p.

Hantz D., Colas B., Dewez T., Lévy C., Rossetti J.P., Guerin A., Jaboyedoff M. 2020 : Caractérisation quantitative des aléas rocheux de départ diffus. Rev. Fr. Géotech. 163, 2, 1-8.

Labiouse V. 2004 : Fragmental rockfall paths: comparison of simulations on alpine sites and experimental investigation of boulder impacts. 9<sup>th</sup> International Symp. on Landslides, Rio de Janeiro, Balkem, 457-466.

Lambert S., Bourrier F., Toe D. 2013 : Improving three-dimensional rockfall trajectory simulation codes for assessing the efficiency of protective embankments. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 60, p. 26-36.

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. [www.bafu.admin.ch/uv-1608-f](http://www.bafu.admin.ch/uv-1608-f)

OFEV 2022 : Erfahrungen und Hinweise zur Projektierung von Steinschlagschutzdämmen - Merkblatt. Office fédéral de l'environnement, Berne (en préparation)

Romang H. (éd.) 2008 : Efficacité des mesures de protection. Stratégie « Dangers naturels » Suisse. Projet A 3. Plate-forme nationale « Dangers naturels » PLANAT, Berne : 289 p.

**Rovina H., Liniger M., Jordan P., Gruner U., Bollinger D. 2011** : Empfehlungen für den Umgang mit Sturzmodellierungen. Swiss Bull. angew. Geol. 16/1, 57-79.

Steffen D., Zenklusen E., Zaugg-Ettlin L., Bründl M., Bickel T., Hauser M. (2021): L., Hauser M. (2021) : Guide pratique sur les processus de chute - Détermination des paramètres  $p_{TA}$ ,  $p_{EGI}$  et  $p_{ES}$  entrant dans les analyses de risques sous EconoMe. 38 p. ([EconoMe Home](#) / Documentation / Paramètres / P1 Probabilité d'occurrence spatiale)

Stoffel M., Louis K., Utelli, H.H. 2019 : Skript Modul Sturz. Praxiskurs Gefahrenbeurteilung gravitative Naturgefahren. Spécialistes des dangers naturels FAN. V. 0.1, 51 pp.

**Volkwein A., Schellenberg K., Labiouse V., Agliardi F., Berger F., Bourrier F., Dorren L. K. A., Gerber W., Jaboyedoff M. 2011** : Rockfall characterisation and structural protection – a review. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 11 : 2617-2651.