

# Caractérisation de l'aléa éboulement rocheux

## Etat de l'art





*Guide technique*

# **Caractérisation de l'aléa éboulement rocheux**

Etat de l'art

Ont participé à la rédaction de ce guide :

- Didier HANTZ (ISterre/UGA)
- Bastien COLAS (BRGM)
- Regis BETTON (GIA)
- Vanessa CARRIER LAVOREL (Egis)
- Gabriela CHACON (CD38)
- Patrick DIVOUX (EDF)
- Hugues FOLTZER (BG)
- Christian FRANCK (Ineris)
- Muriel GASC (Cerema)
- Camille HALBWACHS (Géolithe)
- Cédric LAMBERT (IMSRN)
- Stéphane LAMBERT (Inrae)
- Anne LESCURIER (CD73)
- Didier MAZET-BRACHET (Alp'géorisques)
- Laurent MUQUET (Arias-Montagne)
- Carine PEISSER (PARN)
- Anne-Gaelle RUIZ (SNCF réseaux)
- Etienne SERPOLLET (CD73)

Groupe de relecture :

- Nathalie ANDREIS (ONF-RTM)
- Pierre AZÉMARD (Cerema)
- Marianne CHAHINE (Cerema)
- Guilhem DEVEZE (EdF, président du CFGI)
- Jean-Louis DURVILLE
- Clara LEVY (BRGM)
- François NICOT (Inrae)

**Comment citer cet ouvrage :**

Projet National C2ROP. *Caractérisation de l'aléa éboulement rocheux - Etat de l'art*  
Bron : Cerema, 2020. Collection : Connaissances. ISBN : 978-2-37180-470-8

# Sommaire

<b>Avant-propos</b>	<b>5</b>
<b>Introduction</b>	<b>7</b>
<b>Chapitre 1 - Spécificité de l'aléa éboulement rocheux</b>	<b>8</b>
<b>Chapitre 2 - Recommandations internationales ou nationales</b>	<b>9</b>
2.1. Recommandations du JTC1 (2008)	9
2.2. Recommandations suisses	11
2.2.1. Aide à l'exécution concernant la gestion des dangers dus aux glissements de terrain, aux chutes de pierres et aux coulées de boue (OFEV, 2016)	11
2.2.2. Méthode EconoMe pour évaluer l'efficacité et le caractère économique des mesures de protection contre les dangers naturels (OFEV, 2015)	13
<b>Chapitre 3 - Définition quantitative de l'aléa et du risque rocheux</b>	<b>15</b>
3.1. Cas d'un enjeu menacé par un aléa localisé	15
3.2. Cas d'un enjeu menacé par N aléas localisés	16
3.3. Cas d'un enjeu menacé par un aléa diffus	16
3.3.1. Simulation 3D de la propagation	16
3.3.2. Simulation 2D de la propagation	18
3.3.3. Méthode de l'angle d'énergie en 2D	18
3.3.4. Méthode de l'angle d'énergie en 3D	19
3.3.5. Modélisation par évènement ou par blocA	20
3.4. Modélisation d'éboulements en masse	20
<b>Chapitre 4 - Identification des aléas</b>	<b>21</b>
4.1. Approche globale (aléa diffus)	21
4.2. Approche détaillée	23
4.3. Sectorisation de la zone d'étude	25
<b>Chapitre 5 - Caractérisation quantitative d'un aléa diffus</b>	<b>26</b>
5.1. Caractérisation directe de l'aléa résultant à partir d'un inventaire des évènements ayant atteint la zone d'enjeu	27
5.1.1. Fréquence estimée à partir d'un inventaire des éboulements ayant atteint une route	27
5.1.2. Fréquence estimée à partir d'un inventaire de blocs déposés sur un versant	29
5.2. Caractérisation par estimation de l'aléa de départ et simulation de la propagation	29
5.2.1. Fréquence de départ des blocs estimée à partir d'un relevé des blocs déposés sur le versant	29
5.2.2. Fréquence de départ des blocs estimée à partir de mesures topographiques de la falaise	30
5.2.3. Fréquence de départ des blocs estimée à partir d'inventaires historiques et d'observations géomorphologiques	32
5.2.4. Fréquence de départ des blocs estimée à partir des impacts sur les arbres et d'un relevé des blocs déposés sur le versant	35
5.2.5. Méthode simplifiée pour estimer la fréquence de départ des blocs	36
5.3. Cas des inventaires comportant peu d'évènements	39

<b>Chapitre 6 - Caractérisation qualitative d'un aléa diffus</b>	<b>40</b>
6.1. Méthodes utilisant un système de notation	40
6.2. Recommandations françaises	41
6.2.1. Guide pratique versant rocheux	41
6.2.2. Guide méthodologique PPRN, risque mouvements de terrain	42
6.2.3. Proposition du groupe de travail MEZAP	44
<b>Chapitre 7 - Caractérisation des aléas localisés</b>	<b>49</b>
7.1. Estimation de la probabilité de rupture en utilisant un système de notation	49
7.2. Estimation de la probabilité de rupture à dire d'expert	50
7.2.1. Méthode LCPC	50
7.2.2. Pratique des bureaux d'études français	55
7.3. Approche quantitative globale	58
<b>Conclusion</b>	<b>59</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>60</b>

## Avant-propos

Le projet national C2ROP Chutes de blocs, *Risques Rocheux et Ouvrages de Protection* (2015-2019) s'est proposé d'aborder de manière globale et concertée la problématique du risque rocheux depuis les processus de genèse (aléas), jusqu'aux stratégies de protection (parades, gestion du risque). A ce titre, ce projet a su rassembler la plupart des éléments de connaissance à ce jour disponibles dans le domaine du risque rocheux, puis développer et transférer vers le monde opérationnel des outils, méthodes et concepts nouveaux en s'appuyant sur l'ensemble des plateformes expérimentales, afin d'améliorer tant les produits que les bonnes pratiques à mettre en œuvre.

Ces dernières années, des avancées considérables ont été obtenues dans le domaine académique : mécanique appliquée aux géomatériaux et aux structures, modélisation numérique, investigation expérimentale en laboratoire ou *in-situ*, analyse de l'aléa et du risque. Elles ont trouvé au travers de ce projet un formidable champ d'application et une source d'inspiration et d'innovation. Les méthodes numériques modernes permettent désormais de modéliser de manière pertinente le comportement de structures complexes sous chargement dynamique. Les puissances de calcul auxquelles on peut accéder aujourd'hui rendent possible des simulations remarquablement fines, prenant en compte les mécanismes élémentaires fondamentaux, mais ouvrant sur des résultats pertinents pour l'ingénieur. Des installations sur site permettent d'explorer le comportement des ouvrages en vraie grandeur ; le site expérimental de Montagnole en Savoie pour les structures de protection en est une illustration parfaite. Cette connaissance et ces outils rassemblés par C2ROP sont le socle fondamental du processus de gestion du risque associé.

L'ancrage très fort du projet national auprès de l'ensemble de la communauté académique (universités, organismes publics de recherche) et opérationnelle (gestionnaires, maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, bureaux d'ingénierie, entreprises) a garanti son exigence et sa crédibilité. Sa capacité à supporter des actions de recherche a permis de lever les principaux verrous et de donner accès à des outils, méthodes, guides et référentiels techniques, attendus par toute la profession. Le présent document est l'un des 10 guides et recommandations produits par C2ROP autour des trois axes du projet :

### Axe Aléas

- Glossaire du risque rocheux
- Caractérisation de l'aléa éboulement rocheux : Etat de l'art

### Axe Parades

- Merlons pare-blocs : Recommandations pour la conception, le suivi de réalisation et la maintenance
- Les Ouvrages Déflecteurs : Guide technique
- Surveillance instrumentale pour la gestion du risque rocheux : Recommandations

### Axe Risque

- Prise en compte des risques rocheux par les Maîtres d'Ouvrage gestionnaires d'infrastructures : Recommandations
- Cahier des charges type pour l'étude de l'aléa éboulement rocheux et la définition des travaux
- Cahier des charges type pour les travaux de protection contre les éboulements rocheux
- Mémento des ouvrages de protection contre les éboulements rocheux : Maintenance et Coûts
- Aide à la formalisation de retours d'expérience à la suite d'un événement rocheux sur infrastructures de transport : Note méthodologique

Cette production technique conséquente et aboutie est le reflet de près de 5 années de travail collaboratif des 45 partenaires du projet. Qu'ils soient ici tous chaleureusement remerciés pour leurs multiples efforts engagés et leur dynamisme. Il ne fait aucun doute que la communauté du risque rocheux saura exploiter avec intérêt cette production technique.

*Le Comité de Pilotage du Projet National C2ROP*

Ce document présente différentes méthodes pouvant être utilisées pour caractériser l'aléa éboulement en termes d'intensité (énergie ou volume) et de fréquence (fréquence temporelle ou probabilité d'occurrence), afin de permettre ensuite une analyse du risque. Les recommandations internationales et quelques recommandations nationales concernant les mouvements de pente en général (*landslides*) sont d'abord évoquées. Puis le cadre théorique permettant de caractériser l'aléa rocheux et le risque associé est exposé en définissant quantitativement les différentes notions utilisées. Différentes méthodes quantitatives ou qualitatives sont ensuite présentées, pour caractériser d'abord les aléas diffus (approche globale à l'échelle d'un versant rocheux homogène), puis les aléas localisés (approche par compartiment rocheux potentiellement instable).

### Participants au projet C2ROP



## Introduction

L'objectif de ce rapport est de faire le point sur les différentes méthodes pouvant être utilisées pour caractériser l'aléa éboulement, à partir d'une étude bibliographique des revues internationales. Il ne porte pas sur l'acquisition des données nécessaires à une étude d'aléa, mais sur la manière de les exploiter pour caractériser l'aléa en termes d'intensité (énergie ou volume) et de fréquence (fréquence temporelle ou probabilité d'occurrence), afin de permettre ensuite, au besoin, une analyse du risque. Les données nécessaires à une étude d'aléa et les méthodes d'acquisition de celles-ci sont décrites dans le guide « Les études spécifiques d'aléa lié aux éboulements rocheux » (LCPC, 2004) et dans le document C2ROP «Cahier des charges type pour l'étude de l'aléa éboulement rocheux et des parades».

Le phénomène d'éboulement rocheux est défini rapidement dans le chapitre 1.

Dans le chapitre 2, nous présentons des recommandations internationales ou nationales qui ne sont pas spécifiques au risque rocheux, mais concernent les mouvements de pente en général (« *landslides* » au sens large).

Avant de décrire les différentes méthodes de caractérisation de l'aléa rocheux, il est apparu nécessaire de définir précisément et quantitativement les différentes notions utilisées spécifiquement pour le risque rocheux. C'est l'objet du chapitre 3.

Dans la démarche de l'évaluation de l'aléa et du risque, la première étape consiste à identifier les zones où des éboulements peuvent se produire. Cette étape est explicitée dans le chapitre 4.

Dans les chapitres suivants, nous traitons d'abord de la caractérisation d'un aléa diffus car cette approche synthétique à grande échelle fournit le recul indispensable à toute étude d'aléas (diffus ou localisés) quel que soit son niveau de détail ultérieur. Le chapitre 5 donne quelques exemples d'études quantitatives d'aléa diffus et du risque associé, et le chapitre 6 présente les différentes approches utilisées pour l'évaluation qualitative de l'aléa, notamment en France. Des pistes d'amélioration sont proposées.

La caractérisation des aléas localisés est traitée dans le chapitre 7. Sont d'abord présentées les méthodes utilisant un système de notation (pratiquement pas utilisées en France), puis les méthodes françaises avec estimation à dire d'expert de la probabilité de rupture, et enfin une approche quantitative globale, intégrant les aléas localisés dans leur contexte d'aléa diffus.

Le vocabulaire utilisé dans ce rapport est celui défini dans le glossaire C2ROP.

# Chapitre 1 - Spécificité de l'aléa éboulement rocheux

Selon la classification de Cruden et Varnes (1996), la plus utilisée, les mouvements de pente (*landslides*) sont décrits par deux termes correspondant respectivement à la nature du matériau et au mécanisme du mouvement : par exemple, *rock slide*, *rock topple*, *rock fall* pour les phénomènes qui concernent la rupture et la propagation des compartiments rocheux. La traduction littérale donne glissement, basculement et chute de roche. Dans la pratique française, le terme « éboulement rocheux » est plus utilisé que chute de roche. Le terme chute de blocs est ambigu si l'on restreint la définition de bloc à une certaine plage de volume. Il convient également de noter que les termes glissement et basculement peuvent aussi bien désigner des mécanismes de déformation de grande ampleur que des mécanismes de rupture conduisant à un éboulement rocheux (*rock fall*).

Selon Cruden et Varnes (1996), une chute est un mouvement très rapide (quelques km/h à quelques dizaines de km/h) au cours duquel le matériau se déplace **par chute libre, rebond ou roulement**. Il est généralement précédé par un mouvement initial de glissement ou de basculement. Cette définition ne fait pas référence à une notion de volume. Dans une proposition de mise à jour de la classification de Cruden et Varnes (1996), Hungr et al. (2014) précisent que dans une chute, y a peu d'interaction entre les fragments en mouvement, qui interagissent principalement avec le substratum. Lorsque l'interaction entre fragments augmente et que le mouvement ressemble à un écoulement granulaire, il est qualifié d'avalanche rocheuse (*rock avalanche*). Cette distinction est importante d'un point de vue pratique, car seul le premier type de mouvement (appelé *fragmental rock fall*) peut être simulé en calculant la trajectoire d'un simple bloc (modèles classiques utilisés en trajectographie). D'après Hungr et al. (2014), il est difficile de fixer une limite en termes de volume entre les deux phénomènes, car elle dépend de la taille des blocs. Le glossaire C2ROP distingue les éboulements sans interaction et les éboulements avec interactions.

Le terme d'aléa désigne un phénomène incertain pouvant provoquer des dommages. Dans le cas des éboulements, c'est le passage d'un ou plusieurs éléments rocheux sur un emplacement donné qui peut provoquer des dommages (si un enjeu se trouve sur le passage). L'amplitude de ces dommages dépend essentiellement de l'énergie des éléments rocheux. Comme le phénomène résulte du départ de ces éléments rocheux (aléa de départ ou de rupture) et de leur propagation (aléa de propagation), il est qualifié d'aléa résultant. Lorsqu'un compartiment rocheux potentiellement instable est identifié, on a affaire à un aléa de départ localisé. Lorsque des compartiments peuvent se détacher d'une zone de falaise donnée, relativement homogène, sans qu'ils soient identifiés individuellement, il s'agit d'un aléa diffus.

Un aléa diffus est caractérisé essentiellement par la fréquence des chutes d'un certain volume dans une zone de départ donnée (aléa de départ) et par la fréquence des passages avec une certaine énergie dans la zone de propagation correspondante. La probabilité qu'il se produise  $n$  événements (ou au moins 1) dans une période donnée sur un emplacement donné, peut être déduite de la fréquence en adoptant une loi d'occurrence temporelle comme la loi de Poisson. Un aléa localisé est caractérisé principalement par son volume, son mécanisme de rupture potentiel, sa probabilité de rupture dans une période donnée (période de référence), la description déterministe ou probabiliste de sa trajectoire (fragmentation, énergie et hauteur de vol des éléments) et *in fine*, par la probabilité qu'un emplacement donné soit atteint par un élément rocheux avec une certaine énergie, dans le délai considéré.

# Chapitre 2 - Recommandations internationales ou nationales

Nous évoquons dans ce chapitre quelques recommandations internationales ou nationales, en soulignant quelques points importants.

## 2.1. Recommandations du JTC1 (2008)

En 2008, le comité technique pour les mouvements de terrain et les pentes (JTC1), issu des sociétés internationales de mécanique des sols (ISSMGE), de mécanique des roches (ISRM) et de géologie de l'ingénieur (IAEG), a publié des «recommandations pour le zonage de la susceptibilité, de l'aléa et du risque mouvement de pente (glissements, éboulements) pour l'aménagement du territoire» (Fell et al., 2008), dans le but de contribuer à l'amélioration des méthodes de zonage. Elles s'appliquent à différentes échelles d'études (jusqu'aux études spécifiques de site) et à tous types d'infrastructures. Les auteurs soulignent le besoin croissant d'une gestion quantitative du risque et les progrès récents qui la rendent maintenant possible. Ces recommandations s'appuient notamment sur l'état de l'art établi par Fell et al. en 2005, et ont été ensuite complétées par des recommandations pour l'analyse quantitative du risque mouvement de pente (Corominas et al., 2014). Nous reprenons ci-dessous quelques points importants des recommandations.

La Figure 2.1 présente la méthodologie recommandée pour la gestion du risque. Cette méthodologie, largement utilisée internationalement, est détaillée dans l'article de Fell et al. (2005), qui donne également une définition quantitative du risque, reprise ensuite dans les recommandations de 2014. Pour un mouvement de pente unique (localisé), le risque est donné par l'expression :

$$R = P(M_i)P(X_j|M_i)P(T|X)V_{ij}C \quad (2.1)$$

R est le risque dû à l'occurrence d'un mouvement de magnitude  $M_i$  (le volume pour les éboulements, NDLR) sur un enjeu situé à une distance  $X$  de la source.  $P(M_i)$  est la probabilité d'occurrence d'un mouvement de magnitude  $M_i$ ,  $P(X_j|M_i)$  est la probabilité que le mouvement atteigne la distance  $X$  avec une intensité  $j$ ,  $P(T|X)$  est la probabilité que l'enjeu se trouve au point  $X$  au moment du mouvement (appelée exposition),  $V$  est la vulnérabilité de l'enjeu à un mouvement de magnitude  $i$  et d'intensité  $j$  et  $C$  la valeur de l'enjeu. Les deux premiers termes caractérisent l'aléa. Leur produit est défini dans le glossaire C2ROP comme la probabilité d'atteinte d'un point. L'expression (4.1) s'applique au risque humain individuel en donnant à  $C$  la valeur 1 (1 vie humaine).

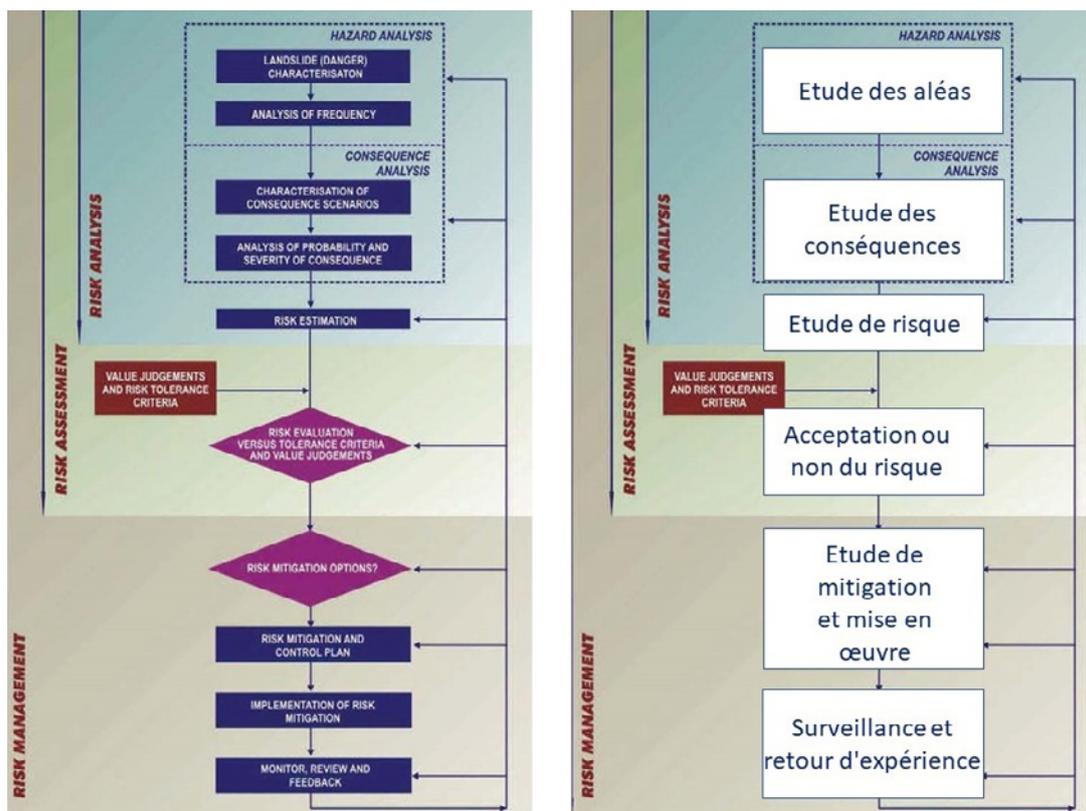


Figure 2.1 : Méthodologie de la gestion du risque (JTC1, 2008). Figure originale et traduction partielle

Afin d’uniformiser la terminologie utilisée dans les études qualitatives, le JTC1 recommande d’utiliser les qualificatifs donnés dans le Tableau 2.1. Des qualificatifs sont également proposés pour décrire le risque humain individuel (Tableau 2.2) et le risque matériel.

Qualificatif	très élevé	élevé	modéré	faible	très faible
Aléa diffus : nombre par an par km de falaise ou de déblai	> 10	1 à 10	0,1 à 1	0,01 à 0,1	< 0,01
Aléa localisé : probabilité annuelle d’occurrence	10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-3</sup> -10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-5</sup>	< 10 <sup>-6</sup>

Tableau 2.1 : Terminologie recommandée pour qualifier la fréquence ou la probabilité d’un aléa localisé (de volume connu) ou d’un aléa diffus pour une classe de volume donnée d’après (d’après JTC1, 2008)

Qualificatif	très élevé	élevé	modéré	faible	très faible
Probabilité annuelle de décès d’une personne exposée	> 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-4</sup> à 10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-5</sup> à 10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-6</sup> à 10 <sup>-5</sup>	< 10 <sup>-6</sup>

Tableau 2.2 : Terminologie recommandée pour qualifier le risque humain individuel (d’après JTC1, 2008)

Une étude d’aléa nécessite de considérer la dimension temporelle des phénomènes (fréquence temporelle). Lorsque celle-ci n’est pas considérée explicitement, on devrait parler d’étude de susceptibilité. Mais cette recommandation n’a pas toujours été suivie et l’on parle aussi d’évaluation qualitative de l’aléa lorsque la dimension temporelle n’est pas explicitée. Pour le zonage de l’aléa éboulement, le JTC1 préconise de représenter la fréquence des évènements d’une intensité donnée (énergie ou volume). L’énergie est le paramètre le plus pertinent, mais son estimation nécessite une modélisation. Dans les méthodes rapides, c’est le volume qui est utilisé.

Selon la méthodologie décrite dans la Figure 2.1, une étude d'aléa est entreprise afin de déterminer un risque *a priori* inconnu, d'estimer s'il est acceptable ou non et le cas échéant, de le réduire. Notons que si le risque n'est pas quantifié, il est difficile d'estimer s'il est acceptable. Mais il arrive aussi que le MOA (maître d'ouvrage) déclenche une étude d'aléa parce qu'il estime que le risque n'est pas acceptable compte tenu des dommages déjà constatés (sans qu'il n'y ait eu d'étude d'aléa préalable). L'étude d'aléa a alors pour but de réduire le risque, sans forcément l'estimer dans l'absolu. Dans cette optique, on peut se contenter d'une évaluation relative qualitative de l'aléa (étude de susceptibilité), qui permet de mettre en évidence les zones où le risque est le plus élevé, mais ne permet pas une analyse coût-bénéfice.

## 2.2. Recommandations suisses

Il existe en Suisse un document d'aide à l'exécution concernant la gestion des dangers dus aux mouvements de terrain, publié par l'Office fédéral de l'environnement (OFEV, 2016, remplace les recommandations OFAT/OFEF/OFEFP, 1997), ainsi qu'un logiciel en ligne permettant d'analyser les risques à partir des cartes des intensités établies selon ce document ([www.econome.admin.ch](http://www.econome.admin.ch)). Les formules utilisées sont données dans le recueil de formules publié par l'OFEV en 2015 et dans le guide du concept de risque (PLANAT, 2009), qui comporte une partie A générale et une partie B (en Allemand) avec un chapitre pour chaque phénomène.

### 2.2.1. Aide à l'exécution concernant la gestion des dangers dus aux glissements de terrain, aux chutes de pierres et aux coulées de boue (OFEV, 2016)

Les processus traités dans le document OFEV (2016) sont : les chutes (chute de pierres, chute de blocs, éboulement, effondrement, chute de glace et effondrement) ; les glissements (glissement de terrain et tassement) ; les écoulements (coulées de boue). Nous ne rapporterons ici que ce qui concerne les chutes. Les enjeux concernés sont principalement les personnes, les bâtiments et les infrastructures (p. ex. voies ferrées ou routes).

Les documents de base pour évaluer l'aléa (danger pour les Suisses), sont :

- les documents topographiques, géologiques, hydrogéologiques et hydrologiques ;
- le cadastre des événements naturels (comportant la date des événements, leur zone d'influence, les dommages) ;
- le cadastre des ouvrages de protection ;
- la carte des phénomènes (recense les indicateurs géomorphologiques observés sur place, tels que blocs éboulés, zones potentiellement instables, etc.).

Trois niveaux de détail sont distingués pour l'évaluation des dangers :

- la carte indicative des dangers donne un aperçu de l'occurrence spatiale des processus dangereux, sans différencier les degrés de danger ;
- la carte des dangers est utilisée aux échelons communal et cantonal pour transposer la situation de danger dans l'aménagement du territoire, elle distingue cinq degrés de danger ;
- l'étude de détail porte par exemple sur un projet d'ouvrage de protection, son dimensionnement, un risque important ou une pente spécialement dangereuse.

A partir des documents de base cités précédemment, le dossier d'une carte des dangers comporte :

- les cartes des intensités afférentes aux scénarios décrivant les événements de période de retour égale à 30 ans, 100 ans et 300 ans, ainsi que l'événement extrême si nécessaire ;
- le rapport technique contenant tous les calculs, modélisations et explications nécessaires ;
- les coupes transversales ou trajectoires ;
- la carte de danger à cinq degrés avec le périmètre des zones étudiées.

Les études de détail peuvent comporter en plus :

- les données quantitatives sur les déformations du massif le cas échéant ;
- les résultats des modélisations des processus de chute, y compris les énergies et les hauteurs de rebond à l'emplacement des ouvrages de protection (en vue de les dimensionner) ;
- l'évaluation quantitative de l'effet des ouvrages de protection ;
- les cartes des intensités et des dangers avant et après la réalisation de mesures.

Un exemple de cartes des intensités (en niveau d'énergie) pour des aléas diffus est donné sur la Figure 2.2. Les 3 cartes montrent les intensités de périodes de retour respectives 30, 100 et 300 ans, qui correspondent théoriquement à l'aléa résultant. Mais la méthode pour passer de la fréquence de départ à la fréquence d'atteinte n'est pas donnée. La fréquence de départ est estimée à partir du cadastre des événements et de la carte des phénomènes. Pour les événements extrêmes, il faut tenir compte des événements non détectés à l'endroit considéré, mais qui se sont produits dans des régions ou des situations comparables. Leur fréquence peut être extrapolée à partir du cadastre des événements.

Les cartes des intensités sont utilisées pour établir la carte de danger (exemple Figure 2.3), pour analyser les risques (www.econome.admin.ch), pour concevoir des ouvrages de protection ou pour planifier des mesures d'urgences.

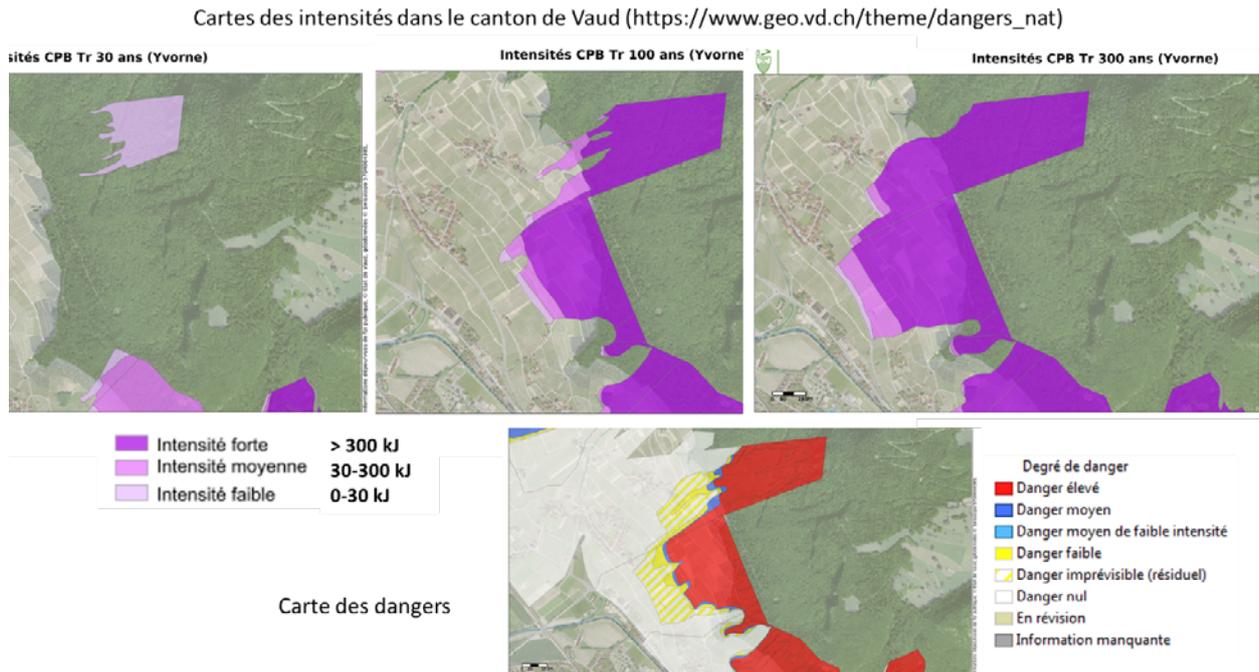


Figure 2.2 : Exemple de cartes des intensités et de carte des dangers dans le canton de Vaud

Le degré de danger (niveau d'aléa) est établi en combinant la fréquence de l'aléa résultant avec son intensité, comme indiqué sur le diagramme intensité-fréquence de la figure 2.3. Sur la carte sont indiqués en plus de la couleur, le type de phénomène (CPB pour chute de pierres et de blocs, etc.) et le numéro de la case du diagramme.

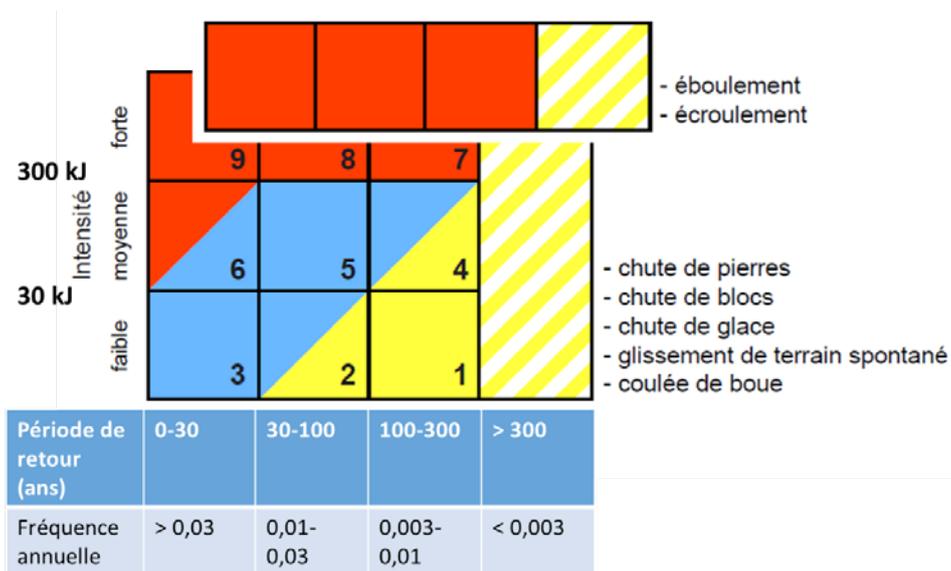


Figure 2.3 : Détermination du degré de danger en Suisse, d'après le document OFEV (2016).  
 Rouge : danger élevé. Bleu : danger moyen. Jaune : danger faible. Hachuré jaune/blanc : danger résiduel

### Commentaires

- a) Contrairement au JTC1, qui recommande de cartographier la fréquence pour une intensité donnée, les recommandations suisses préconisent des cartes d'intensité pour différentes fréquences fixées.
- b) La manière d'établir les cartes d'intensité en utilisant des simulations trajectographiques n'est pas précisée. Des approches rigoureuses ont été proposées par exemple par Jaboyedoff et al. (2005), Hantz et al. (2016, 2017, 2019) et Farvacque et al. (2019). Elles sont basées sur la fréquence de départ des chutes ou des blocs élémentaires, qui constitue une donnée d'entrée pour une simulation trajectographique 3D ou pour la méthode de l'angle d'énergie. Elles permettent d'obtenir pour toute cellule du versant, les intensités correspondant à différentes fréquences (que l'on peut exprimer par exemple, en nombre de blocs par an et par m de largeur). Une approche simplifiée consiste à supposer que l'énergie obtenue par simulation trajectographique, a une période de retour qui est celle du bloc considéré au départ (bloc centennial par exemple). Elle surestime donc la fréquence correspondant à une intensité donnée, ou l'intensité correspondant à une fréquence donnée, et donc le degré de danger.
- c) Contrairement aux recommandations du JTC1, la fréquence d'atteinte n'est pas exprimée par unité de largeur de falaise (ou plus précisément d'enjeu). Il en résulte que l'estimation du degré de danger n'est pas homogène d'un site à l'autre car elle peut dépendre de l'étendue de la zone considérée si une approche 2D est utilisée pour la trajectographie (la fréquence de départ est grossièrement proportionnelle à la longueur de falaise étudiée) ou de la taille des cellules du MNT dans le cas d'une simulation 3D. Pour pallier ce défaut dans l'analyse quantitative du risque, le logiciel EconoMe (Bründl et al., 2015) introduit un facteur appelé probabilité d'occurrence spatiale, égal au rapport de la largeur d'une chute à la longueur de la zone considérée.

## 2.2.2. Méthode EconoMe pour évaluer l'efficacité et le caractère économique des mesures de protection contre les dangers naturels (OFEV, 2015)

Pour illustrer la méthode, nous prendrons l'exemple du risque encouru par des personnes se trouvant dans un objet fixe, mais elle s'applique également au trafic routier, ferroviaire et aux remontées mécaniques. En combinant les expressions (1), (50) et (53) du recueil de formules OFEV (2015), le risque individuel moyen encouru par une personne se trouvant dans un objet fixe  $i$  dans le scénario  $j$ , est donné par :

$$r_j = p_j p(rA)_j \lambda(G)_j p(pr)(1 - \epsilon) \quad (2.2)$$

Les notations d'origine ont été conservées pour faciliter une lecture éventuelle des documents de l'OFEV. Cependant, l'indice  $i$  a été omis pour améliorer la lisibilité de l'expression.  $p_j$  est la fréquence du scénario  $j$  (dans la zone étudiée NDLR),  $\lambda(G)_j$  est la létalité encourue par les personnes se trouvant dans l'objet fixe (bâtiment, objet spécial), dans le scénario  $j$ , en fonction du processus et de son intensité,  $p(pr)$  est la probabilité de présence de la personne dans l'objet,  $\epsilon$  est le facteur de protection de l'objet fixe et  $p(rA)_j$  la probabilité d'occurrence spatiale à l'endroit considéré, dans le scénario  $j$ . Cette probabilité est définie comme le rapport entre la largeur concernée par le phénomène ( $x_j$ ) à la largeur de la zone étudiée ( $X_j$ ). Pour un scénario d'aléa diffus de chute de bloc, c'est donc le rapport entre la largeur d'un bloc et la largeur de la zone étudiée. En introduisant ce rapport dans l'expression (4.2), on obtient :

$$r_j = \frac{p_j}{x_j} x_j \lambda(G)_j p(pr)(1 - \epsilon) \quad (2.3)$$

L'introduction de la probabilité d'occurrence spatiale permet donc de transformer la fréquence d'atteinte globale dans la zone étudiée en une fréquence par unité de largeur (fréquence spatio-temporelle), qui est multipliée par la largeur effectivement concernée par le phénomène pour obtenir la fréquence d'atteinte d'un point. Notons que celle-ci n'est pas explicitée dans EconoMe, dont le résultat final est le risque.

### Commentaires

La définition de la probabilité d'occurrence spatiale suppose que l'enjeu est petit devant la largeur du phénomène, ce qui n'est pas le cas pour les chutes de blocs. En toute rigueur, il faudrait multiplier la fréquence spatio-temporelle par la somme de la largeur du phénomène et de la largeur de l'enjeu (voir chapitre 3).

### 2.2.3. Recommandations de la Principauté d'Andorre

Les recommandations de la Principauté d'Andorre (Labiouse et Abbruzzese, 2011 ; Mavrouli et al., 2014) sont inspirées des recommandations suisses, mais les seuils sont différents (Figure 2.4b). La différence entre les seuils d'énergie s'explique par le fait qu'en Suisse, le risque est traité en priorité par des mesures d'aménagement du territoire (zonage réglementaire) alors qu'en Andorre, on utilise plus fréquemment des ouvrages de protection passive, qui peuvent supporter des énergies plus élevées que les bâtiments. Ainsi, une énergie entre 300 et 10000 kJ est considérée comme élevée en Suisse, car elle dépasse la capacité d'un mur en béton armé, alors qu'elle est moyenne en Andorre, car elle peut être supportée par un ouvrage de protection. On constate que le choix de l'adjectif employé (moyen ou élevé) est influencé par le fait que le niveau d'énergie en question soit acceptable ou non, compte tenu du risque qu'il représente. En réalité, c'est donc le risque plutôt que l'aléa, qui est qualifié et la relation quantification-qualification relève du législateur. **Cette comparaison montre qu'il est nécessaire, même avec une méthode qualitative, de préciser les ordres de grandeur correspondant aux qualificatifs employés.**

Notons également que les fréquences de rupture et d'atteinte sont estimées par classe de volume, à partir d'inventaires historiques et d'observations géomorphologiques (cicatrices et dépôts). La fréquence d'atteinte est qualifiée de faible lorsque la probabilité de propagation est inférieure à un seuil, qui dépend de la classe de volume :  $10^{-1}$ ,  $10^{-2}$  et  $10^{-4}$  pour les classes de volume 1-10 m<sup>3</sup>, 10-100 m<sup>3</sup> et 100-1000 m<sup>3</sup> respectivement. L'adjectif faible ne décrit donc pas objectivement la fréquence mais tient compte du fait qu'un petit volume est plus acceptable qu'un gros.

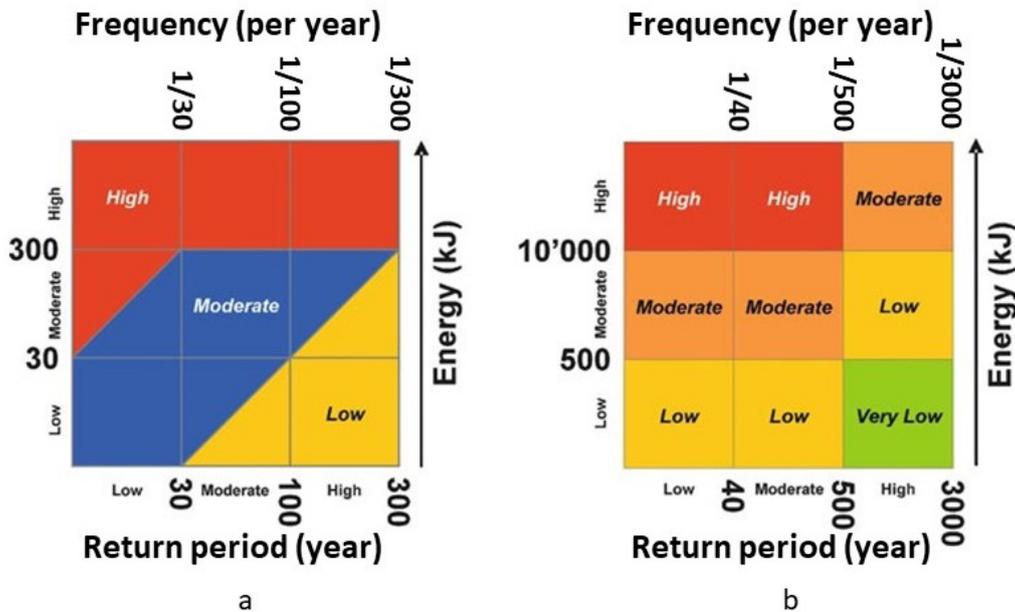


Figure 2.4 : Qualification du niveau d'aléa résultant en Suisse (a) et en Andorre (b)

# Chapitre 3 - Définition quantitative de l'aléa et du risque rocheux

Avant de décrire les différentes méthodes d'évaluation quantitative ou qualitative de l'aléa, il est nécessaire de définir précisément et quantitativement les différentes notions utilisées. D'autre part, comme de nombreuses méthodes s'intègrent dans l'analyse du risque sans forcément individualiser l'aléa, leur compréhension nécessite de définir également les notions utilisées pour évaluer le risque. La présentation qui suit s'inspire notamment de Fell et al. (2005) et Farvaque et al. (2019), où l'on pourra trouver une présentation plus rigoureuse.

## 3.1. Cas d'un enjeu menacé par un aléa localisé

La localisation, le volume et la forme du compartiment potentiellement instable sont connus.

Même si l'aléa et donc le risque, sont rarement quantifiés dans le cas d'aléas localisés, une présentation quantitative est nécessaire pour définir précisément les différents concepts utilisés dans l'approche qualitative.

La probabilité d'impact sur un enjeu en un point donné s'écrit :

Probabilité d'impact = Exposition x Probabilité de départ x Probabilité de propagation

$$\text{ou } P_i = P_e P_d P_p \quad (3.1)$$

- $P_e$  est la probabilité de présence de l'enjeu au point considéré, appelée aussi exposition (pour un enjeu fixe,  $P_e = 1$ ).  $P_e$  représente la probabilité temporelle que l'enjeu soit exposé au phénomène, c'est-à-dire la probabilité de présence de l'enjeu sur la trajectoire. Elle vaut 1 pour un enjeu fixe. Pour un habitant, c'est la proportion de temps qu'il passe dans son logement. Pour un enjeu (véhicule par exemple) se déplaçant sur un itinéraire, elle dépend de sa vitesse, de sa taille, de la largeur de la trajectoire (du bloc par exemple) et du nombre annuel de passages. Si l'on s'intéresse au risque sociétal, il faut prendre en compte le trafic (Corominas et al., 2018) ;
- $P_d$  est la probabilité de départ (ou de rupture) du compartiment rocheux dans un délai donné (année ou période de référence spécifiée) ;
- $P_p$  (probabilité de propagation) est la probabilité que le compartiment (ou une partie de celui-ci) se propage jusqu'au point considéré, sachant qu'il s'est détaché. C'est une probabilité conditionnelle ;
- Le produit  $P_d P_p$  représente la probabilité (non conditionnelle) que le compartiment (ou une partie de celui-ci) atteigne le point considéré dans le délai considéré. On l'appelle probabilité d'atteinte.

Le risque, défini comme la valeur attendue (espérance mathématique) du dommage est donné par l'expression :

Risque = Valeur x Vulnérabilité x Exposition x Probabilité de départ x Probabilité de propagation

$$\text{ou } R = C W P_e P_d P_p (= C W P_i) \quad (3.2)$$

Il est généralement exprimé en coût annuel (humain ou monétaire) lorsque la valeur de l'enjeu est formulée. Il peut également se limiter au pourcentage d'endommagement de l'enjeu impacté.

- $C$  est la valeur de l'enjeu (monétaire, vies humaines, etc.);
- $W$  est la vulnérabilité, définie comme le degré de perte, compris entre 0 et 1.

Notons que le coût annuel moyen ne représente qu'une vision partielle du risque. On peut s'intéresser également à sa distribution de probabilité, c'est-à-dire à la probabilité de dépasser un certain coût (Farvacque et al., 2020).

La vulnérabilité dépend de l'énergie ( $E$ ) de l'élément rocheux qui impacte l'enjeu. Un exemple de courbe de vulnérabilité est donné au paragraphe 5.2.3. (Figure 5.10). Comme l'énergie n'est généralement connue que de manière probabiliste, il en est de même de la vulnérabilité. En théorie, son espérance est donnée par :

$$\bar{W} = \int P_p(E) W(E) dE \quad (3.3)$$

On obtient alors :

$$R = C \bar{W} P_e P_d P_p \quad (3.4)$$

En pratique dans les études quantitatives, l'espérance de  $W$  est généralement estimée par une simulation numérique probabiliste basée sur la méthode de Monte-Carlo, qui consiste à simuler  $M$  fois la propagation. Elle est alors donnée par l'expression :

$$\bar{W} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W(E_i) \quad (3.5)$$

- $n$  étant le nombre de simulations ayant atteint le pixel considéré.

En introduisant cette expression dans (3.4) et avec  $P_p = n/M$ , on obtient :

$$R = CP_e P_d \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M W(E_i) \quad (3.6)$$

## 3.2. Cas d'un enjeu menacé par N aléas localisés

Si les évènements sont indépendants, la probabilité d'atteinte d'un emplacement par au moins une chute, est (Fell et al., 2005) :

$$P_a = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{ai}) \quad (3.7)$$

avec  $P_{ai} = P_{di} P_{pi}$  (probabilité d'atteinte par l'aléa  $i$ ).

Si les  $P_{ai}$  sont suffisamment petits ( $< 0,01$ ), on obtient pratiquement le même résultat en les sommant :

$$P_a \approx \sum_{i=1}^N P_i \quad (3.8)$$

Avec cette hypothèse, le risque peut être estimé facilement à partir d'une simulation numérique probabiliste basée sur la méthode de Monte-Carlo, avec  $N$  compartiments potentiellement instables :

$$R = CP_e \sum_{i=1}^N P_{di} \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M D(E_j) \quad (3.9)$$

Notons qu'avec ce modèle, dans le cas de plusieurs aléas localisés, le risque peut être supérieur à la valeur de l'enjeu. En effet, le modèle suppose que l'enjeu est remplacé après chaque évènement (dégâts réparés, autres personnes exposées).

## 3.3. Cas d'un enjeu menacé par un aléa diffus

En théorie, l'approche précédente pourrait être généralisée à l'étude d'un aléa diffus (compartiments non localisés). Mais en pratique, on ne connaît pas les probabilités de départ des compartiments susceptibles de tomber, mais plutôt la fréquence de départ des chutes dans une zone donnée, à partir de laquelle on peut déterminer la fréquence d'atteinte d'un emplacement quelconque. Si l'on s'intéresse à la probabilité qu'au moins une chute atteigne cet emplacement, on peut la déterminer à partir de la fréquence, en adoptant une loi d'occurrence temporelle comme la loi de Poisson (Corominas et al., 2014).

Les fréquences annuelles de départ sont déterminées à partir d'inventaires d'éboulements s'il en existe, ou/et par analogie avec des falaises situées dans le même contexte géologique, géomorphologique et climatique, dont la fréquence de départ spatio-temporelle est connue (nombre de chutes par an et par  $hm^2$  de surface ou par  $hm$  de longueur de falaise). Une méthode simplifiée et rapide est donnée au paragraphe 5.2.5. Quant à la propagation des éléments rocheux, elle peut être simulée numériquement.

### 3.3.1. Simulation 3D de la propagation

Dans le cas fréquent d'une simulation probabiliste 3D, pour une classe de volume donnée  $V$ , on fait partir  $N_s$  blocs de chacune des  $N_c$  cellules de départ, soit un nombre total de blocs  $N_t = N_s N_c$ . Si  $F_d(V)$  est le nombre annuel moyen de chutes de la classe de volume  $V$ , sur l'ensemble de la zone de départ (fréquence de départ), la modélisation simule les chutes sur une durée  $T = N_t / F_d(V)$ . Si  $n$  est le nombre d'éléments ayant atteint une cellule, sa fréquence temporelle d'atteinte est donc :

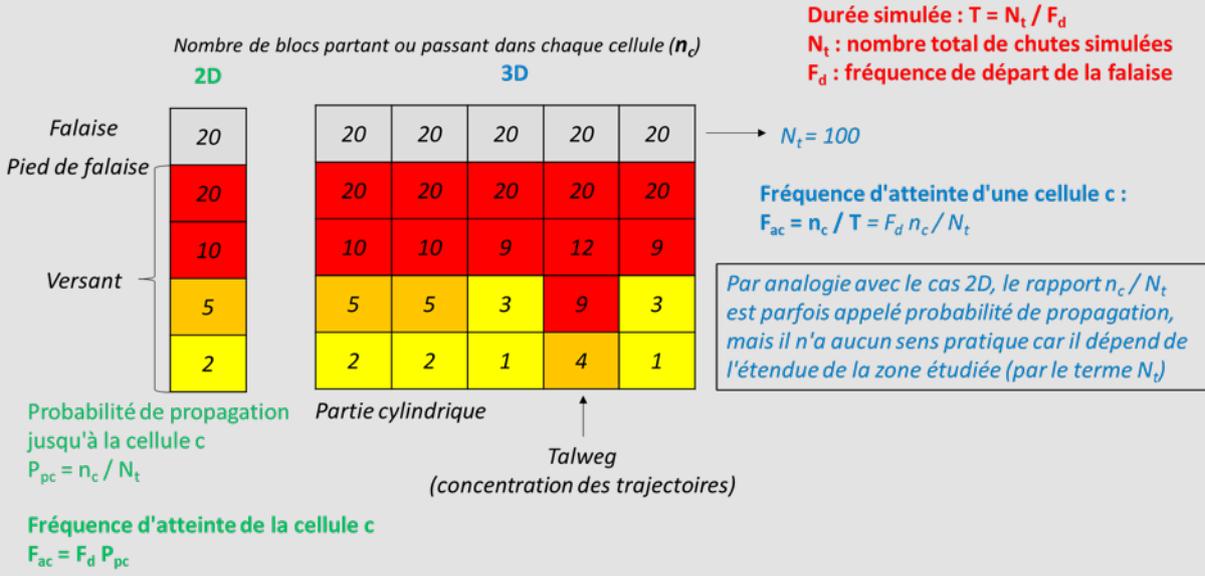
$$F_{ac}(V) = n/T \quad (3.10)$$

ou

$$F_{ac}(V) = F_d(V) n/N_t \quad (3.11)$$

**Commentaire 1**

Le rapport  $n/N_t$  est parfois qualifié de probabilité de propagation par analogie avec le cas d'un aléa localisé (dans Rockyfor3D par exemple), mais il n'est pas une caractéristique intrinsèque de la cellule car il dépend du choix (arbitraire) de l'étendue de la zone modélisée ou de son découpage en zones homogènes de même fréquence de départ. En revanche, si l'on considère une rangée de cellules plus ou moins parallèle à la falaise et approximativement de même longueur, le rapport du nombre d'éléments ayant atteint ces cellules sur le nombre total  $N_t$  ne dépend pratiquement plus de l'étendue de la zone modélisée. D'autre part, on constate que  $n/N_t = F_{ac}(V) / F_d(V) = F_{ac}(V) T_d(V)$ ,  $T_d(V)$  étant la période de retour d'une chute de volume  $V$  dans la zone de départ étudiée. Ce rapport représente donc le nombre moyen de chutes atteignant une cellule sur une durée égale à la période de retour d'une chute de volume  $V$  dans la zone de départ étudiée, et en première approximation, la probabilité d'atteinte de la cellule sur cette même durée.



**Commentaire 2**

La méthode décrite suppose que la fréquence de chute  $F_d(V)$  est homogène dans la falaise étudiée. Si ce n'est pas le cas, il est possible pour une durée simulée donnée  $T$ , de simuler un nombre de chutes par cellule qui varie d'une zone à l'autre de la falaise (D'Almeida et al., 2018). La fréquence d'atteinte d'une cellule est alors donnée par l'équation (3.10).

De la fréquence d'atteinte d'une cellule, on peut déduire la fréquence d'atteinte par mètre (fréquence d'atteinte spatio-temporelle  $F_{ast}$ ) en divisant cette fréquence par la largeur  $L_c$  de la cellule :

$$F_{ast}(V) = F_{ac}(V) / L_c \tag{3.12}$$

Pour qu'un point soit touché par un élément rocheux de largeur  $L_b$ , il faut que le centre de gravité de l'élément passe à une distance inférieure à environ  $L_b/2$ . La fréquence d'atteinte  $F_{ap}$  du point est donc :

$$F_{ap}(V) = F_{ast}(V) L_b = F_{ac}(V) L_b / L_c \tag{3.13}$$

Pour qu'un emplacement de largeur  $L_e$  soit touché, il faut que le centre de gravité de l'élément passe sur une ligne de longueur  $(L_e + L_b)$ . La fréquence d'atteinte de l'emplacement est donc :

$$F_{ae}(V) = F_{st}(V) (L_e + L_b) \tag{3.14}$$

Le risque annuel pour un enjeu de largeur  $L_e$  et pour une classe de volume donnée  $V$  s'écrit :

$$R(V) = CP_e \overline{W(V)} F_{ae}(V) \tag{3.15}$$

$\overline{W(V)}$  est donné par l'équation (3.5).

Le risque total pour un enjeu est la somme des risques correspondant à chaque classe de volume.

### 3.3.2. Simulation 2D de la propagation

Sauf dans le cas théorique d'un versant cylindrique (géométrie 2D), le calcul de la fréquence d'atteinte est plus délicat si l'on ne peut faire qu'une simulation 2D. Pour chaque « cellule » exposée, il faut déterminer les zones de départ potentielles correspondantes. Ces zones sont des bandes horizontales, dont les limites latérales sont déterminées en tenant compte des concentrations des trajectoires dans les talwegs. En 2D, chaque point de départ de bloc représente donc en réalité une bande horizontale de laquelle partent les blocs susceptibles d'atteindre le point exposé. Si l'on fait partir  $M$  blocs de ce point, on peut calculer la durée  $T$  ainsi simulée, en divisant  $M$  par la fréquence de départ  $F_d$  de la bande horizontale (produit de sa surface par la fréquence spatio-temporelle de départ). La fréquence d'atteinte de la cellule exposée est alors égale au nombre de blocs l'atteignant ( $n$ ) divisé par cette durée. Elle peut s'exprimer comme suit :

$$F_{ac} = F_d n/M \quad (3.16)$$

Le rapport  $n/M$  est une probabilité de propagation.

Comme dans le cas 3D, on peut déduire la fréquence d'atteinte par mètre (fréquence d'atteinte spatio-temporelle  $F_{ast}$ ) en divisant  $F_{ac}$  par la largeur de la cellule. La fréquence d'atteinte d'un point ou d'un emplacement, ainsi que le risque annuel, peuvent être calculés comme précédemment.

Dans la pratique, pour la production de cartes d'aléa, la simulation en 2D est fréquemment valorisée en multipliant des profils afin de prendre en compte les variations morphologiques des versants.

### 3.3.3. Méthode de l'angle d'énergie en 2D

L'angle d'énergie exprime la perte d'énergie d'un bloc au cours de sa propagation (Jaboyedoff et al., 2011). En théorie c'est l'inclinaison d'une droite joignant la position initiale d'un bloc (plus précisément son centre de gravité) à sa position d'arrêt. Sur le terrain, on la détermine comme indiqué sur la Figure 3.1. Dans un cas idéal de glissement en 2D sans érosion, il est égal à l'angle de frottement de l'interface. Dans le cas plus général d'un éboulement (rebonds, roulement, glissement), sa tangente représente la perte d'énergie par mètre de distance horizontale parcourue. L'angle d'énergie peut varier le long d'un profil.

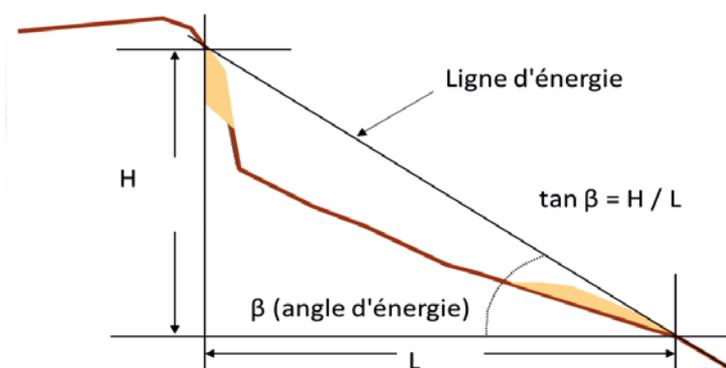


Figure 3.1 : Définition de la ligne d'énergie et de l'angle d'énergie  $\beta$

En pratique, il existe plusieurs définitions : le point initial peut être le sommet de la cicatrice laissée par la rupture (« reach angle » / angle d'atteinte) ou le pied de la falaise (« shadow angle » / angle d'ombre). Par rapport à la simulation des trajectoires, la méthode de l'angle d'énergie présente l'avantage de ne comporter qu'un seul paramètre, facilement mesurable sur le terrain après un éboulement. Mais elle présente l'inconvénient de ne donner qu'approximativement l'énergie cinétique, et pas la hauteur de vol.

Colas et al. (2018) ont mis en évidence, sur la base de retours d'expériences de plusieurs centaines d'éboulements rocheux, une relation forte entre la morphologie de versant et les valeurs d'angle d'énergie des blocs éboulés (Figure 3.2). Cette relation constitue une aide à la décision objective dans le choix de valeurs d'angle pour la cartographie de la propagation. Elle permet de connaître la distribution de probabilité de l'angle d'énergie pour une aire normalisée donnée et donc de déterminer la probabilité de propagation en un point quelconque du profil étudié (l'aire normalisée reflète la concavité du profil). Notons que la méthode ne prend pas en compte la nature du terrain, le volume et la forme des blocs.

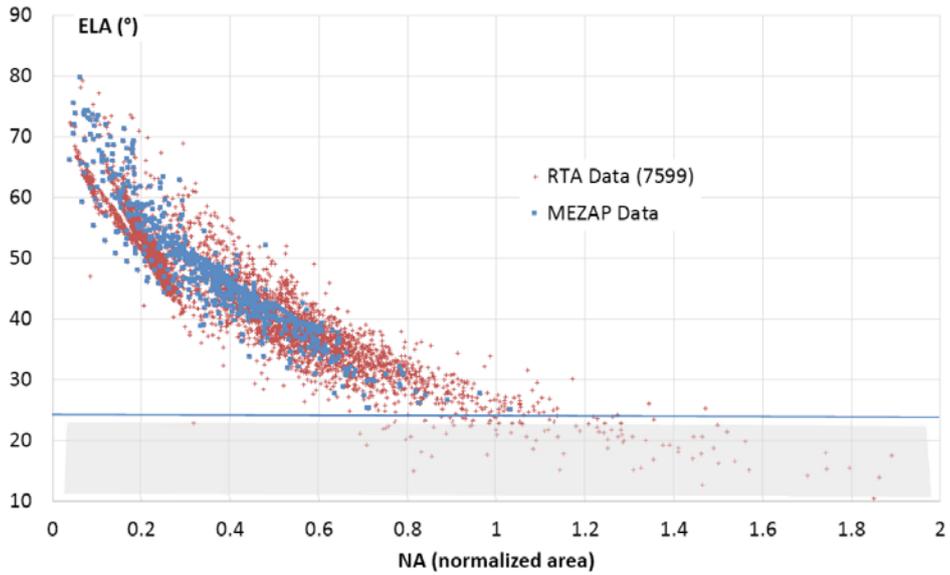


Figure 3.2 : Relation entre angle d'énergie  $\beta$  (reach angle) et aire normalisée de profil de propagation

### 3.3.4. Méthode de l'angle d'énergie en 3D

La méthode de l'angle d'énergie peut être appliquée aux trajectoires non planes, mais pour quantifier l'aléa résultant, il faut tenir compte de la convergence ou de la divergence des trajectoires. Son application nécessite donc une détermination au moins géométrique des trajectoires, la probabilité de propagation sur chaque trajectoire étant déterminée en utilisant l'angle d'énergie. Un couplage entre détermination géométrique des trajectoires et approche énergétique déterministe a été utilisé par Almeida et al. (2011, Figure 3.3) et Michoud et al. (2012).

L'application automatique de la méthode simplifiée des cônes (Jaboyedoff et al., 2011) est moins réaliste qu'une simulation 3D des trajectoires, car toutes les trajectoires contenues dans une plage d'azimuts définie a priori sont considérées comme équiprobables.

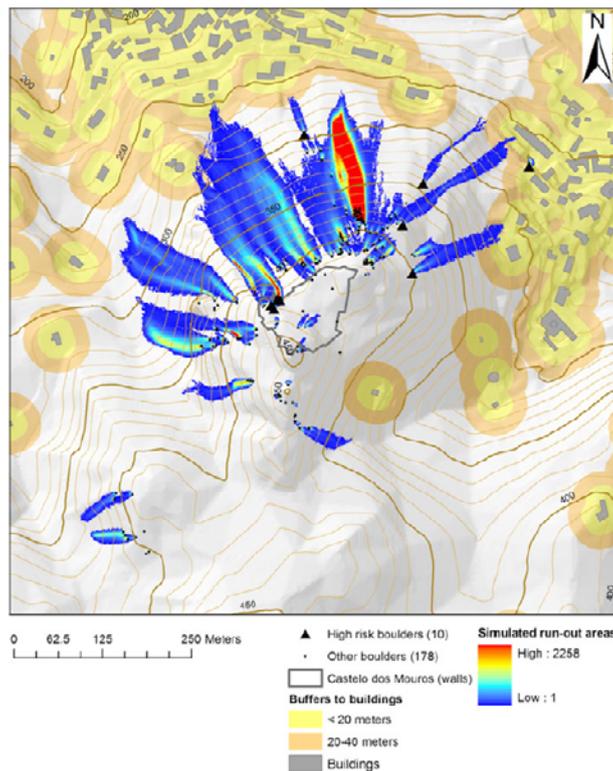


Figure 3.3 : Hiérarchisation de la propagation par le nombre de trajectoires par pixel (Almeida, 2012)

### 3.3.5. Modélisation par évènement ou par bloc

Dans les études quantitatives, l'aléa de départ est le plus souvent caractérisé par la fréquence annuelle des évènements, chaque évènement consistant généralement en la chute de plusieurs éléments rocheux, du fait de la fragmentation des compartiments rocheux. Ruiz-Carulla et al. (2016) distinguent la désagrégation (*disaggregation*) du compartiment, qui se produit dès le départ du fait de la fracturation existante, et la rupture (*breakage*) des éléments lors des impacts.

La plupart des outils de trajectographie étant conçus pour faire partir des blocs individuels des cellules de départ, il est nécessaire de déterminer la fréquence de départ des blocs. Celle-ci peut être déterminée en divisant en blocs le volume annuel éboulé, en tenant compte de la loi de distribution des volumes élémentaires (Hantz et al., 2016 ; Ruiz-Carulla et al., 2016). Celle-ci peut être déterminée par observation des blocs déposés, mais cela suppose que les blocs ne se fragmentent pas durant la propagation. En pratique, on admet souvent que l'essentiel de la fragmentation se produit au pied de la falaise, avant la propagation dans la pente sous-jacente, et donc que cette hypothèse reste raisonnable. Mais elle sous-entend que la pente sous-jacente est moins dure que le pied de falaise (éboulis par exemple), ce qui n'est pas toujours vrai. Il existe cependant des modèles qui tiennent compte de la fragmentation (Corominas et al., 2018).

## 3.4. Modélisation d'éboulements en masse

Pour les plus gros volumes (éboulements en masse, avalanches rocheuses), il faut tenir compte de l'interaction entre les blocs. La méthode de la ligne d'énergie peut également être utilisée, mais les valeurs d'angle d'énergie sont plus faibles que pour les éboulements sans interaction (Corominas, 1995). Les conditions de rupture (volume notamment) sont déterminantes dans l'évaluation de la propagation. De même, il est montré que la morphologie des zones de propagation (chenalisation, obstruction sur versant opposé en particulier) est un facteur important à prendre en compte.

Des approches moins empiriques, mais plus lourdes à mettre en œuvre, ont été proposées. La plus réaliste est probablement l'approche utilisant les méthodes par éléments discrets (Gasc et Hantz, 2005 ; Cuervo, 2015), mais elle nécessite de grosses ressources de calcul. Des approches continues, basées en particulier sur des modèles d'écoulement granulaire et nécessitant moins de ressources et moins de paramètres, ont également été proposées. Les modèles plus ou moins complexes intègrent les lois d'écoulement (Euler, Lagrange), des conditions de rhéologie interne (décrivant les forces de pression), des hypothèses sur la rhéologie basale (type friction de Coulomb, modèle de Bingham – intégrant la viscosité des masses ébouées, ou de Voellmy qui intègre un facteur de turbulence de l'écoulement) et peuvent potentiellement simuler l'entraînement de matériaux sur le parcours (érosion par décapage de stocks accumulés).

Des applications sont déjà nombreuses (Mangeney et al. 2007, Moretti et al. 2012, 2015, Lucas et al. 2014, Levy et al. 2015, Brunet et al. 2017) y compris en intégrant une dimension probabiliste par introduction des tirages probabilistes pour les paramètres rhéologiques par exemple. L'intérêt de ces méthodes est l'information qu'elles livrent sur la dynamique des glissements (vitesse, épaisseur de matériaux) utile pour une évaluation détaillée de l'aléa.

# Chapitre 4 - Identification des aléas

Dans la démarche de l'évaluation de l'aléa et du risque, la première étape consiste à identifier et caractériser les zones où des éboulements peuvent se produire. Cette étape est explicitée dans ce chapitre. Dans cette optique on différencie l'aléa diffus, pouvant se produire en tout point d'une zone géographique donnée, des aléas ponctuels ou localisés, correspondant à des compartiments rocheux clairement identifiés et localisés.

## 4.1. Approche globale (aléa diffus)

On cherche à identifier les zones où des éboulements peuvent se déclencher (zones d'**aléa diffus**), sans chercher à identifier précisément les compartiments susceptibles de se détacher. En général, les PPRN (plan de prévention des risques naturels) se limitent à cette approche globale.

Le critère le plus simple pour localiser les zones de départ est la pente du versant. Selon le type de paroi et la nature des formations géologiques impliquées, la pente minimale choisie varie entre 37° et 60° (Rouyer et al., 1998, p.134 ; Loye et al., 2009, p.1643). La pente peut également être utilisée pour faire ressortir les zones de départ les plus probables (carte de susceptibilité) en admettant que la fréquence de départ augmente avec celle-ci (Michoud et al., 2012, van Ween et al., 2018). La résolution de la donnée topographique support de ces analyses est essentielle, les MNT basse résolution ayant tendance à lisser les reliefs et donc à masquer les zones de départ potentielles. Des analyses statistiques sur la présence de zones de départ potentielles, sans préjuger de leur activité, ont montré une relation entre pente MNT apparente et départ de chutes de blocs (Berger, 2009). A partir de l'analyse des zones de départ de plusieurs sites d'étude situés en France, Suisse et Autriche, un modèle permettant de calculer la valeur de cette pente limite apparente  $\alpha$  a été calibré. La formule est la suivante :

$$\alpha = 55^\circ \times RES^{-0,075} \quad (4.1)$$

- avec RES = la résolution du MNT  
(Par exemple, si la résolution est de 25x25 m alors RES = 25 et  $\alpha = 43^\circ$ )

Cette approche simple peut avoir tendance à sous-estimer la présence de zones de départ dans des zones de faible pente. A cet égard, les méthodes intégrant divers contextes morphologiques (Loye, 2009) permettent d'améliorer cette prise en compte. De plus, le MNT doit être corrigé de la végétation. *In fine* l'expertise de terrain permet de valider ou d'adapter les limites calculées, à partir de données relatives aux phénomènes passés.

Le parcours du terrain et la photo-interprétation permettent d'identifier plus précisément les zones d'éboulement potentiel (examen des parois et des blocs déposés), ainsi que la recherche bibliographique et l'enquête de voisinage. Une analyse plus poussée consiste à identifier les zones où des mécanismes de rupture connus peuvent se produire. Les principaux mécanismes de rupture sont décrits dans le rapport final du projet Interreg IIC «Falaises» (2001, p.57) et dans le guide LCPC (2004, p.23). Il existe des méthodes simples pour les identifier à partir de la topographie de la falaise et de la structure du massif rocheux (décrite de manière statistique). Parmi celles-ci, on notera les analyses cinématiques présentées par Hoek et Bray (1974, mises à jour par Wyllie et Mah, 2004 et 2017) et Goodman et Shi (1985, présentation dans Goodman, 1989), présentées en français par Gasc et Hantz (2019). Elles ont été mises en œuvre dans des logiciels, d'abord pour des géométries simples de déblais rocheux (logiciel DEGRES, Tanays et al., 1989 ; logiciel RESOBLOCK, Baroudi et al., 1992 ; Merrien-Soukatchoff et al., 2012), puis pour des topographies naturelles modélisées par des systèmes d'information géographique (logiciel MATTEROCKING, Rouiller et al., 1998 ; p.87-110 ; Jaboyedoff et al., 1999, 2004 ; Matasci et al., 2015).

Un exemple d'approche globale est illustré par les Figure 4.1, Figure 4.2 et Figure 4.3, extraites de Matasci et al. (2015). La Figure 4.1 représente les pentes de plus de 48° dans la falaise étudiée. La Figure 4.2 présente les familles de discontinuités identifiées avec le logiciel Coltop3D (Jaboyedoff et al., 2007, Terranum, 2019) et par des mesures de terrain. La confrontation des caractéristiques de ces familles (orientation, espacement, extension) avec le MNT permet d'identifier des mécanismes de rupture potentiels et de déterminer le nombre de ruptures possibles pour chaque cellule du MNT (Figure 4.3).

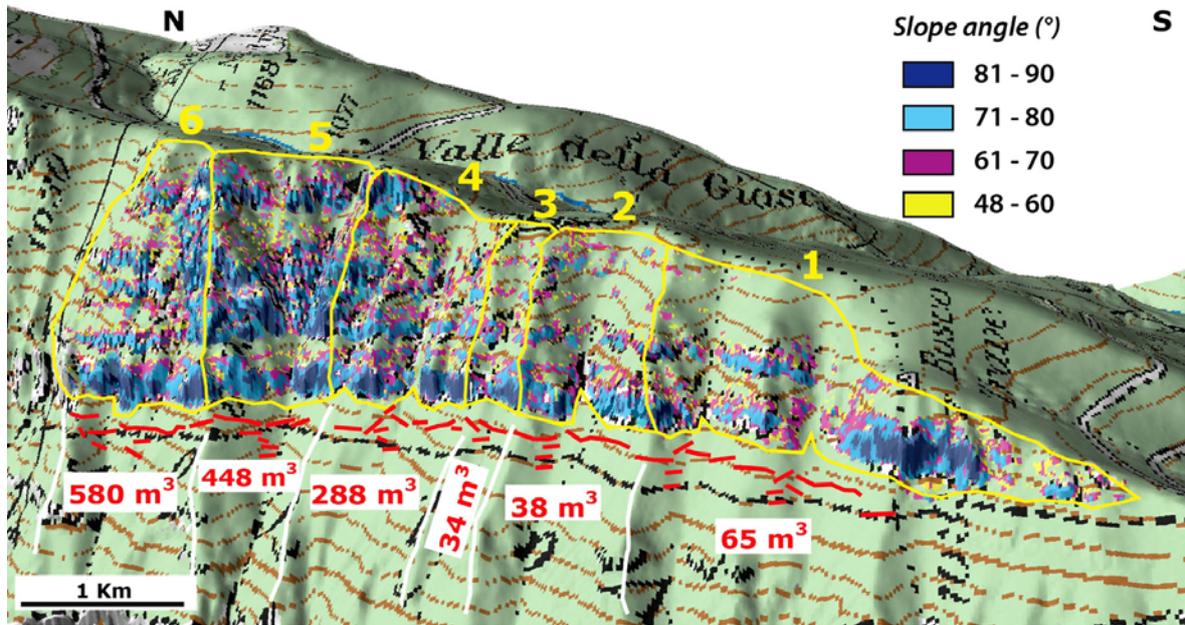


Figure 4.1 : Carte des pentes de plus de 48° pour 6 bassins, établie à partir d'un MNT 2 m x 2 m (Swisstopo). Les volumes de matériau accumulés pendant 40 ans derrière les ouvrages de protection (traits rouges) sont indiqués pour chaque bassin

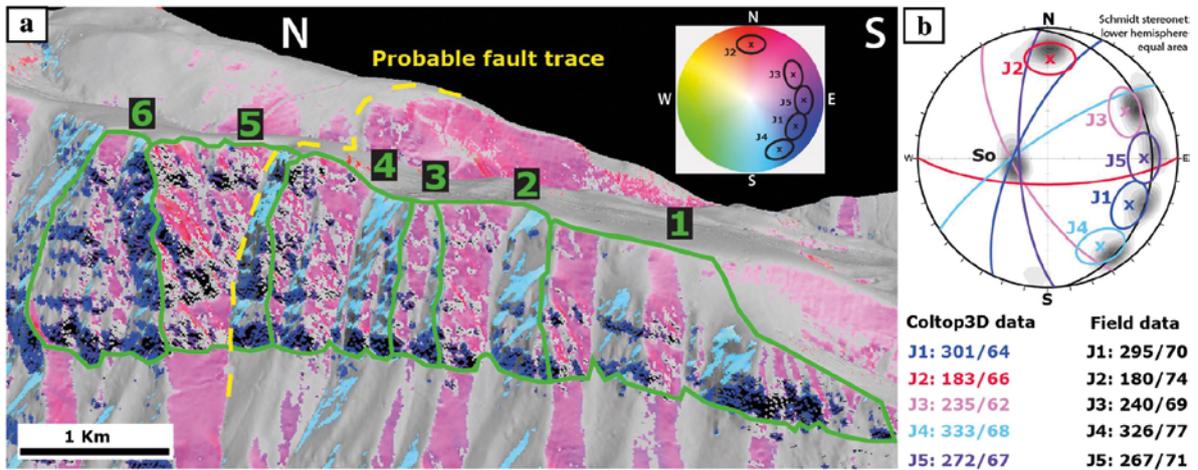


Figure 4.2 : Analyse structurale de la falaise. a) Visualisation des différentes orientations avec le logiciel Coltop3D (Terranum, 2019). b) Familles de joints relevées in situ (en gris) et issues de Coltop3D (en couleur).

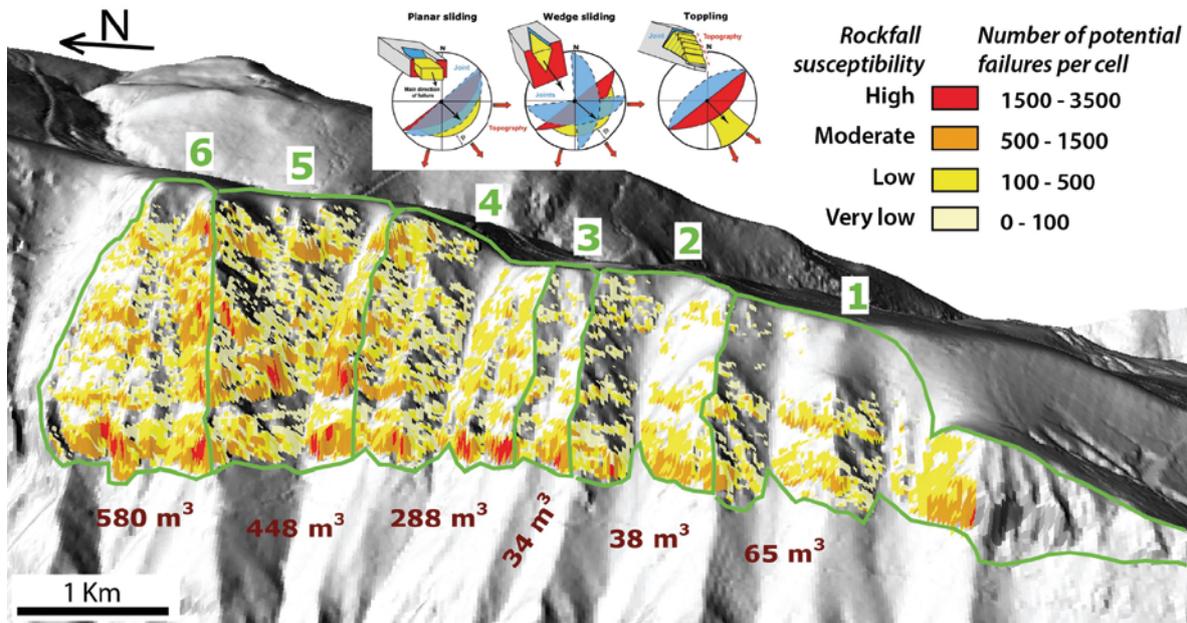


Figure 4.3 : Identification des mécanismes de rupture (représentés avec les stéréogrammes correspondants) et carte de susceptibilité faisant ressortir les zones où les possibilités de ruptures sont les plus nombreuses

## 4.2. Approche détaillée

L'expert cherche à identifier les compartiments susceptibles de se détacher (**aléas localisés**) selon un mécanisme de rupture connu, par observation directe (*in situ*) ou indirecte (sur photos ou modèles numériques de terrain) de la paroi. La Figure 4.4 présente une typologie des mécanismes de rupture donnée dans le guide LCPC (2004).

Bien que rarement utilisée dans la pratique courante, l'identification par simulation numérique du comportement du massif rocheux est également possible. Elle nécessite l'extrapolation vers l'intérieur du massif, des discontinuités identifiées en surface à partir d'un modèle numérique de la surface rocheuse, et l'analyse de la stabilité des éléments ainsi découpés ou prédécoupés. Cette analyse peut être effectuée par la méthode de l'équilibre limite (Merrien-Soukatchoff et al., 2012) ou par celle des éléments discrets (Scholtès et Donzé, 2012 ; Bonilla-Sierra, 2015).

Contrairement à l'approche globale, où la structure du massif est décrite de manière statistique (connaissance des familles de discontinuités), l'approche détaillée nécessite une connaissance déterministe des discontinuités, afin de pouvoir caractériser précisément chaque compartiment identifié (volume, pendage et azimut exact des plans de glissement).

Une nouvelle méthode de reconnaissance permettant de mieux connaître l'extension de certaines fractures critiques délimitant des compartiments rocheux, a été développée au laboratoire ISTERre dans le cadre du projet C2ROP. Elle est basée sur l'étude des fréquences de résonance des compartiments (Valentin et al., 2017).

Mécanisme d'instabilité	Configuration
Glissement plan (fig. 6a et 6b)	
Glissement plan composé	
Glissement de dièdre (fig. 6c et 6d)	
Rupture de surplomb ou de dalle en toit (fig. 6e et 6f)	
Rupture d'écaille en paroi (fig. 6g)	
Basculement de bloc, de panneau ou colonne	
Rupture de pied de colonne (fig. 6h)	

Figure 4.4 : Typologie des mécanismes de rupture (LCPC, 2004). Les figures indiquées entre parenthèses renvoient à des photos qui illustrent ces mécanismes (pages 24 et 25 du guide LCPC (2004))

#### **Commentaire**

*L'analyse mécanique de la stabilité peut contribuer à identifier et à hiérarchiser les zones de départ potentielles, mais les résultats qu'elle fournit ne permettent pas de caractériser les aléas de départ en termes de probabilité de rupture dans un délai donné ou, pour un aléa diffus, en termes de fréquence de chute, ceci pour deux raisons. La première est que l'extrapolation en profondeur des discontinuités visibles en surface induit une incertitude importante, la seconde est que les modèles de comportement mécanique existant ne permettent pas de prévoir l'évolution temporelle du massif rocheux. Cependant, en appliquant des coefficients de sécurité suffisants, l'analyse mécanique permet de garantir la stabilité des compartiments rocheux stabilisés par boulonnage ou par toute autre technique de renforcement.*

### **4.3. Sectorisation de la zone d'étude**

La sectorisation de la zone d'étude consiste en une délimitation de secteurs homogènes du point de vue géologique, structural, morphologique, morphodynamique, hydrologique, climatique, de la localisation des enjeux et donc du point de vue de la caractérisation de l'aléa (guide LCPC, 2004 ; Jaboyedoff et Labiouse, 2003). La sectorisation peut aboutir à une typologie des versants de manière à travailler sur des échantillons représentatifs (guide LCPC, 2004, p.22-26).

La sectorisation en zones homogènes peut permettre ensuite de qualifier ou quantifier l'aléa en termes de fréquence spatio-temporelle de chute ou d'atteinte (nombre d'évènements par unité de temps et de surface ou longueur).

# Chapitre 5 - Caractérisation quantitative d'un aléa diffus

Un aléa diffus est caractérisé essentiellement par la fréquence des chutes d'un certain volume dans une zone de départ donnée (aléa de départ) et par la fréquence des passages avec une certaine énergie dans la zone de propagation correspondante.

La méthode la plus directe consiste à utiliser un inventaire des éboulements ayant atteint la zone d'enjeu durant une période suffisamment longue. Un exemple est donné au paragraphe 5.1.1, dans le cas d'une route. La méthode suppose que les conditions de départ (fréquence) et de propagation (forêt par exemple) n'ont pas varié durant la période d'observation, et si l'observation a lieu après coup, que les blocs n'ont pas été déplacés.

Mais la méthode la plus utilisée est basée sur l'estimation de la fréquence de départ et la modélisation de la propagation (paragraphe 5.2). Elle présente l'avantage de pouvoir comparer l'aléa résultant ou le risque pour différents scénarios de réduction du risque. La fréquence de départ peut être évaluée en termes d'éboulements (événements) ou en termes de blocs individuels (Figure 5.1). Dans le premier cas (approche «événements»), la fréquence peut être évaluée à partir de mesures topographiques successives de la falaise (par scanner laser ou photogrammétrie) ou d'un inventaire historique, et elle est exprimée en fonction du volume des événements. Elle peut aussi être évaluée plus grossièrement par l'observation des cicatrices, qui peuvent rester visibles un certain temps (observation visuelle, stéréoscopique, etc.). Si la simulation des trajectoires ne prend pas en compte le fractionnement des compartiments rocheux, il est nécessaire de déterminer la fréquence de départ des blocs à partir de la fréquence des événements. Pour cela, il est nécessaire de connaître la loi de distribution des volumes des blocs, qui peut être établie en mesurant les tailles des blocs d'un échantillon de blocs déposés. Une loi standard peut également être utilisée (Hantz et al., 2016 ; Ruiz-Carulla et al., 2016).

Dans l'approche «blocs», la loi de distribution des volumes des blocs peut être établie à partir d'un relevé exhaustif des blocs *in situ*, mais le passage à la fréquence temporelle nécessite de connaître la durée pendant laquelle les blocs relevés se sont déposés. Mais celle-ci est généralement très incertaine (sauf dans le cas de blocs arrêtés par un ouvrage dont la date de construction est connue). Une information temporelle précise peut être apportée par le relevé des impacts sur les arbres, qui peuvent être datés par dendrochronologie (analyse des anneaux de croissance des arbres) mais ne permettent pas d'estimer le volume des blocs.

Dans ce chapitre, nous donnerons quelques exemples d'études quantitatives d'aléa diffus et de risque.

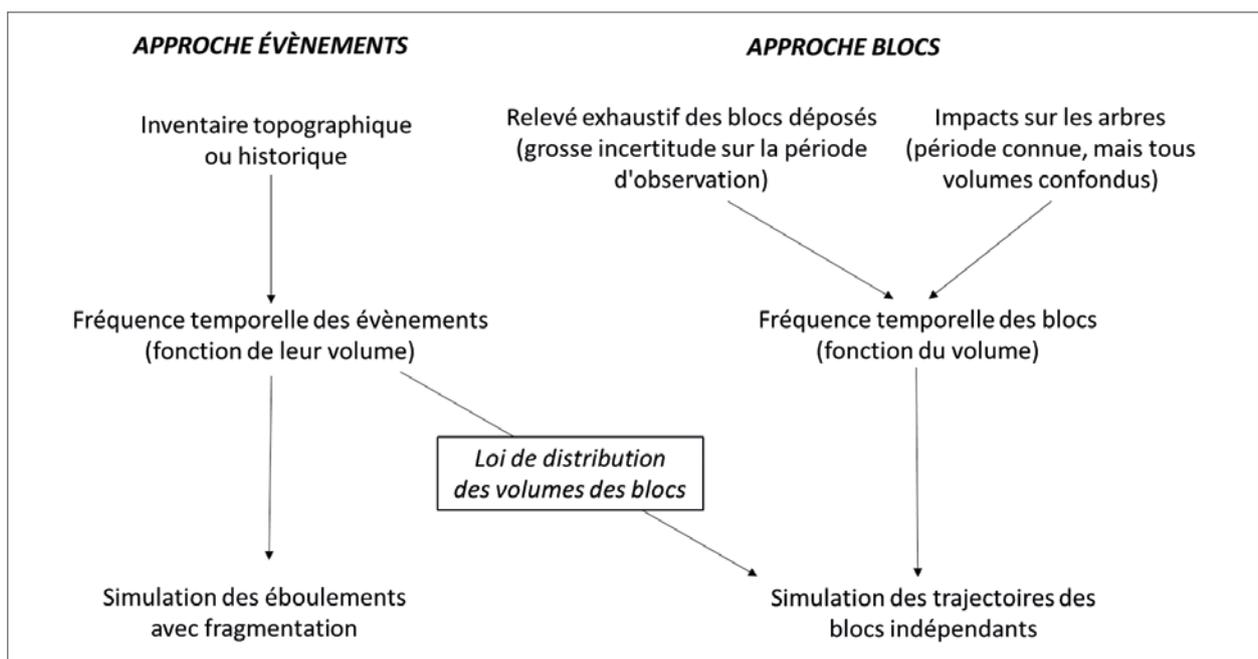


Figure 5.1 : Organigramme fonctionnel pour la caractérisation quantitative de l'aléa diffus

## 5.1. Caractérisation directe de l'aléa résultant à partir d'un inventaire des évènements ayant atteint la zone d'enjeu

L'aléa résultant peut être caractérisé directement s'il existe un inventaire des évènements ayant atteint la zone d'enjeu, portant sur une durée significative (quelques années à quelques dizaines d'années suivant l'activité). La fréquence d'atteinte peut alors être calculée directement pour les volumes figurant dans l'inventaire, et extrapolée pour les volumes plus gros à partir d'une loi de distribution.

### 5.1.1. Fréquence estimée à partir d'un inventaire des éboulements ayant atteint une route

Hungr et al. (1999) présentent une méthode de calcul du risque humain sur un itinéraire, à partir d'un inventaire d'éboulements déposés sur la route étudiée. La fréquence est modélisée par une loi puissance. Il s'agit de la fréquence des éboulements qui ont atteint le bord amont de la route sans forcément atteindre un véhicule. La méthode utilisée est celle décrite au paragraphe 3.3.1. Elle est illustrée par le Tableau 5.1. L'étude de «propagation» consiste simplement à estimer la probabilité qu'un véhicule puisse être atteint, sachant que l'éboulement a atteint le bord amont de la route. Elle est estimée empiriquement (faible pour les plus petits volumes, égale à 1 à partir de 100 m<sup>3</sup>). L'exposition (probabilité de présence) est calculée à partir du trafic, de la vitesse et de la longueur des véhicules et de la largeur des trajectoires d'éboulement.

Classe de volume (m <sup>3</sup> )	Fréquence cumulée (an <sup>-1</sup> )	Fréq. incrementale (an <sup>-1</sup> )	Largeur de la trajectoire (m)	Exposition	Prob. de propagation	Vulnérabilité	Risque humain (mort par an)
0.001	100.000	—	—	—	—	—	—
0.01	36.813	63.187	0.1	0.01	0.1	0.05	0.005
0.1	13.552	23.261	0.1	0.01	0.2	0.1	0.007
1	4.989	8.563	1	0.02	0.4	0.2	0.011
10	1.837	3.152	2	0.02	0.6	0.5	0.018
100	0.676	1.160	5	0.03	0.8	0.8	0.020
1 000	0.249	0.427	10	0.04	1	1	0.017
10 000	0.092	0.157	30	0.09	1	1	0.014
		0.092	50	0.14	1	1	0.013
Total							0.106

Tableau 5.1 : Calcul du risque humain pour une section de route ayant un trafic de 5000 véhicules/jour de 5,40 m de longueur et roulant à 80 km/h (d'après Hungr et al., 1999)

Batista et al. (2005) ont étudié la fréquence des éboulements ayant atteint la RN1 de l'île de La Réunion, dans le but non pas d'évaluer le risque, mais d'optimiser les mesures prises pour réduire la fréquence d'impact sur les véhicules. L'étude des variations spatiales de la fréquence d'atteinte de la route (figure 5.2) a permis de définir des zones prioritaires de sécurisation. L'étude des variations temporelles de cette fréquence et de l'influence de la pluie a permis de définir des règles de fermeture de la chaussée côté falaise (avec basculement sur l'autre chaussée), en termes de pluie cumulée sur 24 h. Sur la figure 7.3, chaque point représente la durée cumulée des basculements obtenue pour une règle donnée sur la période 1998-2002 et le nombre de chutes sur cette chaussée lorsqu'elle est ouverte, ceci avec ou sans sécurisation. La règle effectivement appliquée consistait à fermer la chaussée pour 72 h lorsque la hauteur de pluie dépassait 15 mm en 24 h.

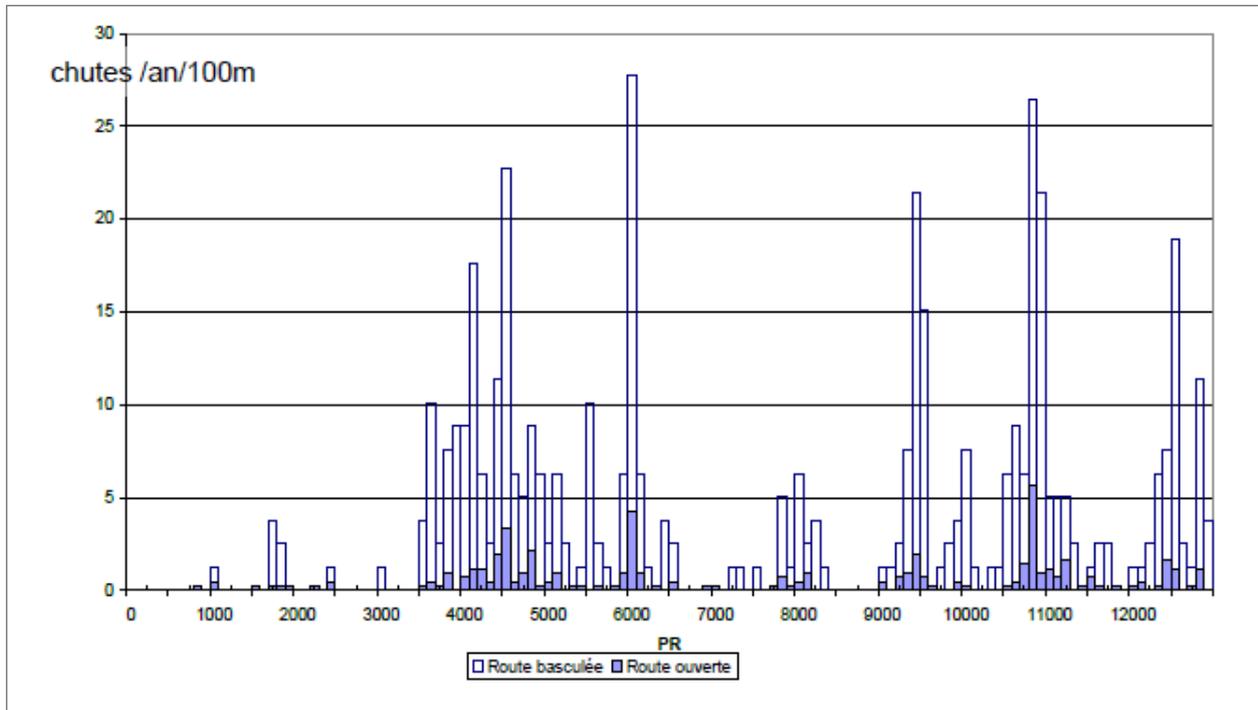


Figure 5.2 : Distribution spatiale de la fréquence de chute côté falaise de 1998 à 2002 (d'après Batista et al., 2005)

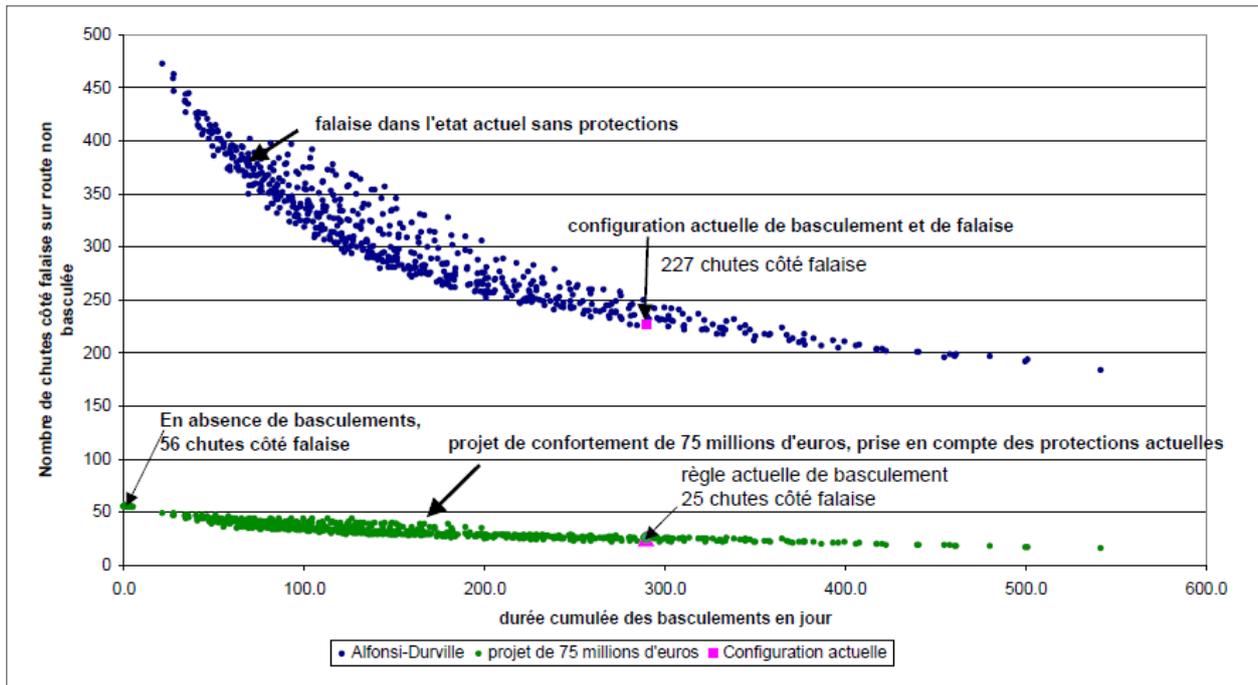


Figure 5.3 : Relation entre la durée cumulée des basculements (obtenue en appliquant différentes règles) et le nombre de chutes sur route non basculée (ouverte), avec ou sans protection (d'après Batista et al., 2005)

### 5.1.2. Fréquence estimée à partir d'un inventaire de blocs déposés sur un versant

Dans certains cas, la fréquence spatio-temporelle d'atteinte pourrait être estimée directement par observation des blocs déposés. Par exemple, en adoptant une loi d'occurrence temporelle de Poisson, si une courbe de niveau de 1000 m de longueur n'a été dépassée par aucun bloc durant une année, on peut en conclure avec un risque d'erreur inférieur à 5 % (valeur fréquemment utilisée en ingénierie, notamment dans l'Eurocode 7), que le nombre annuel moyen de blocs franchissant cette ligne est inférieur à 3, donc que la fréquence est inférieure à 0,3 blocs par siècle et par mètre. En toute rigueur, il faut plutôt considérer une courbe iso-angle d'énergie, et sur une section suffisamment homogène du point de vue de la densité des trajectoires (séparer talwegs et interfluves), ce qui conduit à diminuer la longueur considérée (en compensant si possible par une durée d'observation plus longue).

## 5.2. Caractérisation par estimation de l'aléa de départ et simulation de la propagation

Dans les méthodes présentées, la simulation de la propagation est généralement effectuée en 3D et sans prise en compte de la fragmentation.

### 5.2.1. Fréquence de départ des blocs estimée à partir d'un relevé des blocs déposés sur le versant

Farvacque et al. (2019 ou rapports C2ROP action R3.1) proposent une analyse quantitative du risque à l'échelle d'une commune (Crolles, Isère) et inclut donc une évaluation quantitative de l'aléa résultant, bien que celui-ci ne soit pas explicité dans l'article. La méthode utilisée correspond à celle présentée au paragraphe 5.3.1, les fréquences étant déterminées en termes de blocs et non d'évènements. La fréquence de chutes dans la zone de départ, pour des volumes compris entre 1 et 20 m<sup>3</sup>, est calculée en multipliant la surface de falaise (128 hm<sup>2</sup> de pente > 49°) par la fréquence spatio-temporelle de chute. Celle-ci a été déterminée à partir d'un inventaire de 17 blocs déposés au pied d'une partie de falaise de surface 11,5 hm<sup>2</sup>, et généralisée à l'ensemble de la falaise étudiée. Deux hypothèses ont été faites : a) les blocs relevés représentent la totalité des blocs qui se sont déposés en cent ans ; b) le volume des blocs au départ est le même qu'à l'arrivée. La propagation a été modélisée en utilisant le logiciel Rockyfor3D. 10000 chutes ont été simulées pour chacune des 20331 cellules de départ du MNT. Les volumes ont été déterminés aléatoirement à partir d'une distribution uniforme entre 1 et 20 m<sup>3</sup>. La valeur des enjeux (des bâtiments) est exprimée en m<sup>2</sup> et le risque en m<sup>2</sup> détruits par maison et par an (Figure 5.4). Pour quantifier le risque, la vulnérabilité a été calculée en utilisant la relation énergie-vulnérabilité établie par Agliardi et al. (2009) et représentée sur la Figure 7.10.

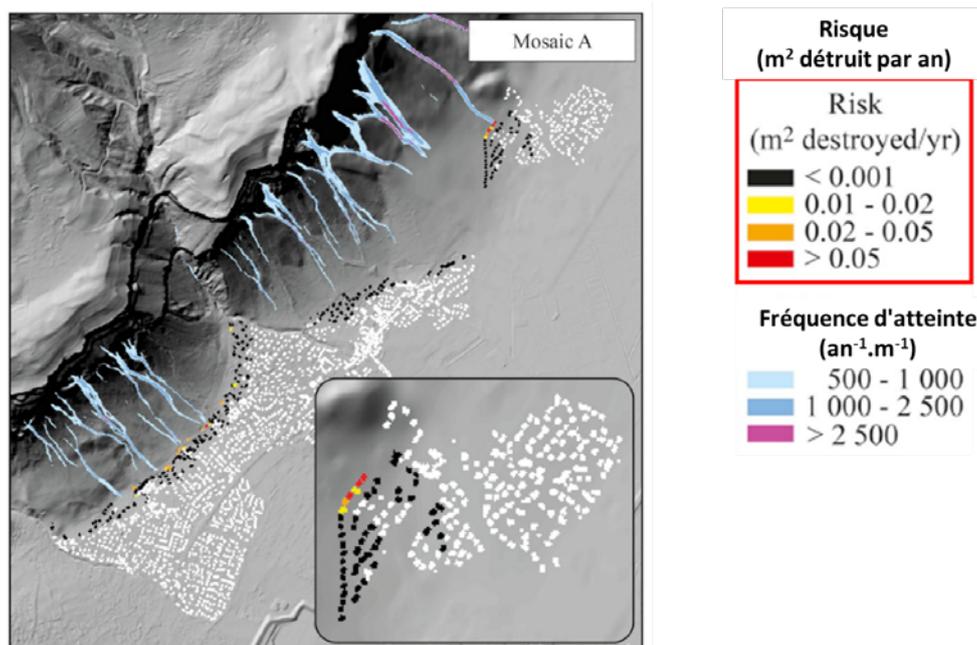


Figure 5.4 : Carte de risque, exprimé en m<sup>2</sup> détruits par année (d'après Farvacque et al., 2019)

## 5.2.2. Fréquence de départ des blocs estimée à partir de mesures topographiques de la falaise

### Fréquence de départ des blocs estimée à partir de scans laser de la falaise et de relevés de blocs

Hantz et al. (2017 ou rapports C2ROP action A1.1) proposent une méthode d'évaluation quantitative de l'aléa résultant, exprimé en termes de fréquence d'atteinte (nombre annuel moyen de passages par mètre de largeur) pour des blocs d'un volume minimal donné, quelle que soit leur énergie. Elle peut également s'appliquer pour une énergie minimale donnée. La Figure 5.5 représente la carte de fréquence d'atteinte pour des blocs de volume supérieur à  $0,1 \text{ m}^3$ , issus de la falaise inférieure du Mont Saint Eynard, près de Grenoble (la falaise supérieure, beaucoup moins active, n'a pas été prise en compte dans ce travail méthodologique).

La fréquence des éboulements (événements) est estimée à partir de deux mesures topographiques de la falaise effectuées à quelques années d'intervalle (une année suffit pour des falaises très actives). Elle est décrite par une loi puissance, qui permet une extrapolation pour estimer la fréquence des événements de volume trop gros pour avoir été observés durant la période de suivi, avec un volume maximal possible (Dussauge-Peisser et al., 2002). Si l'on ne dispose pas de mesures topographiques de la falaise, on peut estimer les paramètres de la loi puissance par analogie avec des falaises similaires, en appliquant le principe de similarité préconisé dans le guide PPRN Mouvements de terrains (MATE/METL, 1999). Grâce à cette loi, on peut calculer le volume moyen qui tombe annuellement de la falaise, en intégrant les événements rares. Ce volume est ensuite réparti en blocs individuels, en utilisant une loi puissance et un volume de bloc maximal possible. La fréquence d'atteinte en tout point du versant peut ensuite être déterminée en simulant la propagation des blocs, dont la fréquence de départ est connue. Du fait du caractère probabiliste de la simulation, la durée simulée doit être suffisamment longue pour que le nombre de trajectoires issues de chaque cellule de départ soit statistiquement significatif.

Dans l'exemple présenté, les trajectoires ont été simulées en utilisant le logiciel Rockyfor3D. Les fréquences de départ de blocs sont nettement plus élevées que dans l'étude de Farvacque et al. (2019) du fait de la prise en compte par extrapolation, des événements de très gros volume, rares mais très productifs en termes de nombres de blocs (un volume maximal possible de  $10^6 \text{ m}^3$  a été considéré). En toute rigueur, ces événements devraient être traités séparément en utilisant un modèle de propagation adapté aux éboulements en masse (forte interaction entre les blocs).

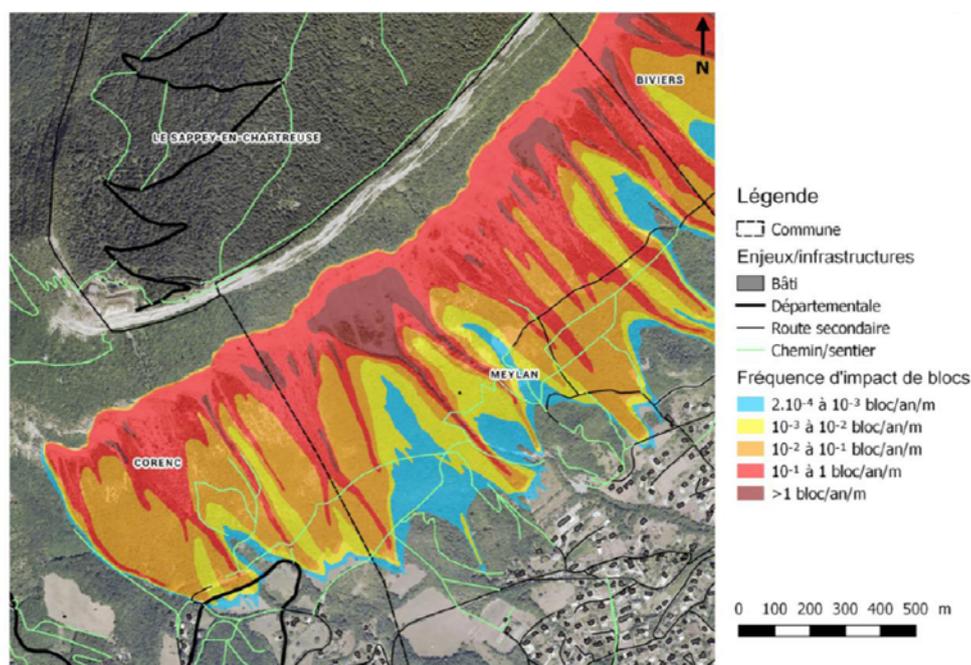


Figure 5.5 : Fréquence d'atteinte exprimée en nombre de blocs par an par m de largeur (Hantz et al., 2017)

### Fréquence de départ des blocs estimée à partir de scans laser de la falaise

Van Ween et al. (2018) ont étudié un aléa diffus menaçant une voie de chemin de fer en Colombie Britannique. La fréquence de départ des éboulements (événements) a été obtenue à partir de scans laser terrestres (TLS) et de deux inventaires historiques (Figure 5.6a). On constate une bonne concordance entre les deux méthodes pour les volumes supérieurs à  $1 \text{ m}^3$ , alors que pour les volumes plus petits, les inventaires historiques ne sont pas exhaustifs et sous-estiment fortement la fréquence.

Cependant, une extrapolation à partir de ces inventaires semble donner des ordres de grandeur corrects. La Figure 5.6b représente la distribution des ruptures en fonction de la pente du versant. On constate que la densité de ruptures augmente fortement à partir de pentes locales de 50-60°. La localisation des chutes détectées par TLS est indiquée sur la Figure 5.6c.

La probabilité de propagation jusqu'à la voie de chemin de fer a été déterminée pour différentes zones de départ situées à des distances différentes de la voie (donc à des altitudes différentes) et pour différents volumes (Figure 5.7b). Ces probabilités ont été ensuite utilisées pour passer de la fréquence de départ à la fréquence d'arrêt sur la voie pour chaque zone de départ. La Figure 5.7a représente la fréquence de départ toutes zones confondues (points noirs) et la fréquence d'arrêt sur la voie (points rouges).

La probabilité de propagation pour une zone de départ et une classe de volume, est le rapport du nombre de chutes arrêtées sur la voie au nombre de départs. Les calculs ont été réalisés avec Rockyfor3D (500 départs par cellule source). Notons que sur la Figure 7.66b, le pourcentage de chutes arrêtées sur la voie augmente avec le volume jusqu'à 1 m<sup>3</sup>, ce qui n'est pas étonnant car les petits éléments vont moins loin dans cette configuration morphologique. La diminution de ce pourcentage au-delà d'1 m<sup>3</sup> est due au fait que les plus gros éléments vont plus loin et franchissent souvent la voie. La Figure 7.8 représente la fréquence des blocs arrêtés avant la voie par le piège à blocs (fossé). La surface grise correspond au volume annuel stocké dans le piège à blocs.

### Commentaire

*La méthode proposée suppose que les compartiments rocheux se propagent comme des blocs monolithiques (logiciel Rockyfor3D), alors qu'en général, ils sont constitués de plusieurs blocs.*

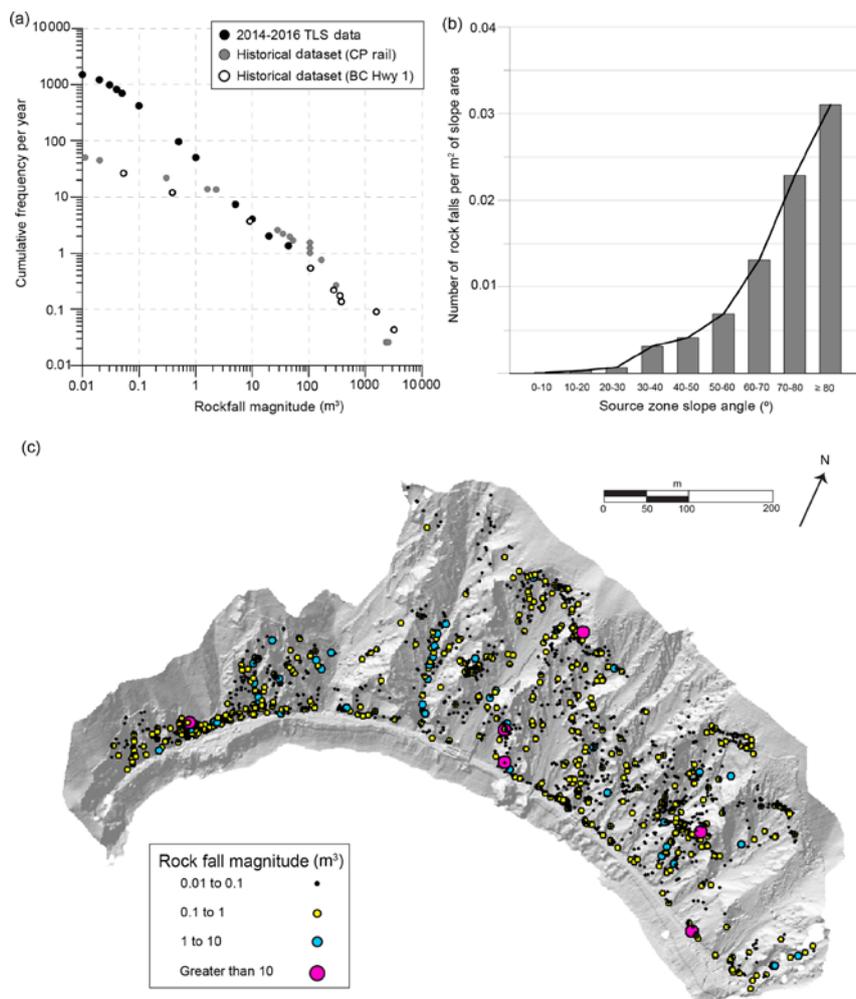


Figure 5.6 : a) Fréquences cumulées de chutes obtenues à partir de scans laser terrestres (TLS) et de deux inventaires historiques. b) Nombre de chutes par m<sup>2</sup> de versant en fonction de la pente. c) Localisation des ruptures détectées par TLS entre le 11/11/2014 et le 02/05/2016 (Van Ween et al., 2018).

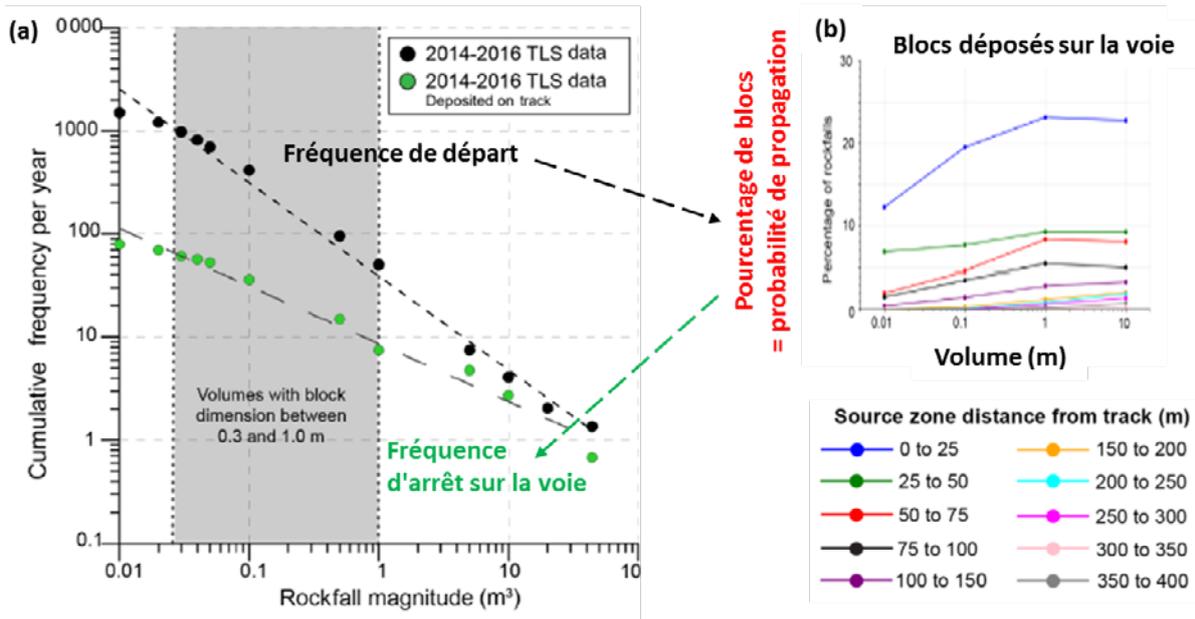


Figure 5.7 : Combinaison de la fréquence de départ et de la probabilité de propagation pour obtenir la fréquence d'arrêt sur la voie. a) Fréquence cumulée de départ et fréquence cumulée des chutes arrêtées sur la voie. b) Probabilité de propagation : pourcentages d'arrêts sur la voie pour différentes zones de départ, et différentes classes de volume. Chaque zone de départ correspond à une distance différente de la voie (donc à une altitude différente) (Van Ween et al., 2018)

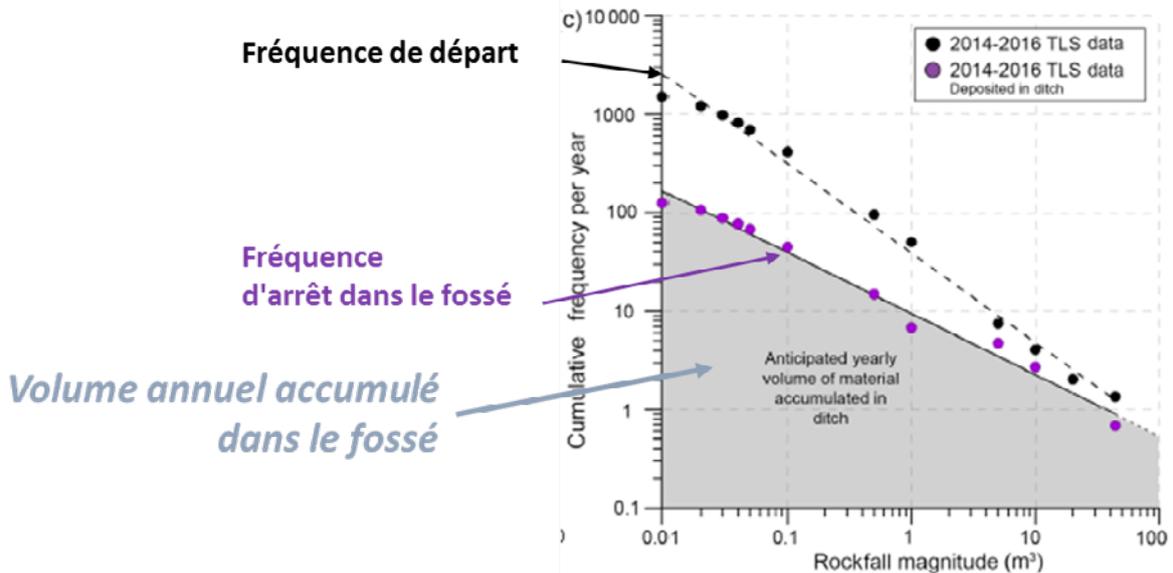


Figure 5.8 : Fréquence cumulée de départ et fréquence cumulée des chutes arrêtées dans le fossé (Van Ween et al., 2018)

### 5.2.3. Fréquence de départ des blocs estimée à partir d'inventaires historiques et d'observations géomorphologiques

#### Etude du risque sociétal humain sur un itinéraire touristique

Corominas et al. (2018) proposent une méthode pour évaluer le risque sociétal humain sur un itinéraire touristique très fréquenté (700 visiteurs/jour), à partir d'un inventaire de 3 gros éboulements et d'un relevé des blocs arrêtés par des ouvrages de protection pendant 15 ans. Le modèle trajectographique est calibré sur un éboulement récent. Comme le logiciel utilisé (RockGIS) peut simuler la fragmentation des compartiments rocheux, il n'est pas nécessaire de répartir empiriquement le volume total en blocs individuels.

Le Tableau 5.2 représente la fréquence annuelle des éboulements (événements) pour l'ensemble de la falaise et pour différentes classes de volume, modélisée par une loi puissance. Le Tableau 5.3 illustre la méthode de calcul du risque pour une section de 195 m de longueur. Les cadres rouges indiquent les résultats obtenus avec prise en compte de la fragmentation, en comparaison de ceux obtenus sans prise en compte de la fragmentation. Pour la section présentée, la prise en compte de la fragmentation diminue le risque, mais ce n'est pas le cas pour toutes les sections. Notons que la probabilité de propagation est ici définie comme le rapport du nombre d'événements (et non de blocs) atteignant la section d'itinéraire analysée sur le nombre d'événements simulés.

La probabilité de présence (exposition) est calculée en tenant compte de la probabilité que l'enjeu mobile (ici des personnes) se trouve sur la trajectoire d'un bloc, sachant qu'un éboulement a eu lieu. Elle dépend de la vitesse de déplacement de l'enjeu et de la largeur de l'éboulement (ou de la taille des blocs si ceux-ci n'occupent pas toute la largeur de l'éboulement). En l'absence de statistiques officielles sur la vulnérabilité des personnes, celle-ci a été estimée heuristiquement.

Volume class	Rockfall volume (m <sup>3</sup> )	Events/year	Annual volume m <sup>3</sup> /year	Volume (m <sup>3</sup> ) per ka	Cumulative volume (m <sup>3</sup> ) in 1 ka
A	≤ 0.005	45.1463	0.226	226	226
	0.005 < x ≤ 0.05	5.9514	0.298	298	523
B	0.05 < x ≤ 0.5	0.7846	0.392	392	916
C	0.5 < x ≤ 5	0.1034	0.517	517	1433
D	5 < x ≤ 50	0.0136	0.682	682	2114
E	50 < x ≤ 500	0.0018	0.899	899	3013
F	500 < x	0.0002	1.185	1185	4198

Tableau 5.2 : Fréquence de départ des éboulements sur les 921 m de falaise (Corominas et al., 2018)

Class M <sub>i</sub> (m <sup>3</sup> )	N <sub>i</sub>	Fréquence de départ	X	Probabilité de propagation jusqu'au sentier	X	Exposition	avec fragmentation		Vulnérabilité	=	Risque (nombre annuel de décès)	avec fragmentation
							P(X:D)	P(T:X)			Risk	Risk
< 0.05	16.32			0.119		0.010	0.000	0.000	0.5		9.9 × 10 <sup>-3</sup>	0.000
0.05 < x < 0.5	0.25			0.328		0.019	0.000	0.000	0.9		1.4 × 10 <sup>-3</sup>	0.000
0.5 < x < 5	3.3 × 10 <sup>-2</sup>			0.590		0.022	0.043	0.034	1.0		4.3 × 10 <sup>-4</sup>	4.7 × 10 <sup>-5</sup>
5 < x < 50	4.3 × 10 <sup>-3</sup>			0.765		0.066	0.233	0.120	1.0		2.2 × 10 <sup>-4</sup>	1.2 × 10 <sup>-4</sup>
50 < x < 500	5.7 × 10 <sup>-4</sup>			0.832		0.124	0.631	0.374	1.0		5.9 × 10 <sup>-5</sup>	1.4 × 10 <sup>-4</sup>
> 500	8.0 × 10 <sup>-5</sup>			0.874		0.153	0.800	0.678	1.0		1.0 × 10 <sup>-5</sup>	4.2 × 10 <sup>-5</sup>
Annual probability of loss of life											0.012	3.5 × 10 <sup>-4</sup>

Tableau 5.3 : Calcul du risque sur une section de falaise de 195 m (Corominas et al., 2018)

### Étude du risque matériel et humain sur des zones habitées

Agliardi et al. (2009) présentent une méthode d'analyse quantitative du risque (matériel et humain), qui permet de comparer des mesures de réduction du risque sur des zones habitées. La propagation est modélisée avec le logiciel HY-STONE, qui ne prend pas en compte la fragmentation des compartiments rocheux. C'est pourquoi seuls les éboulements de moins de 100 m<sup>3</sup> ont été considérés, en supposant qu'ils ne se fragmentent pas. Le modèle est calibré sur un éboulement récent. La fréquence de départ est modélisée par une loi puissance, dont les paramètres ont été fixés en s'inspirant de la littérature et des données historiques et géomorphologiques du site (falaise de 800 m de longueur), mais celles-ci ne sont pas présentées dans l'article. La Figure 5.9 présente l'énergie, la vulnérabilité, la probabilité d'impact, la valeur et le risque pour les bâtiments, pour les chutes de 10 à 100 m<sup>3</sup> et sans ouvrages de protection.

La vulnérabilité est déterminée à partir de l'énergie d'impact, en utilisant la courbe de la Figure 5.10. La Figure 5.11 représente le risque annuel total (bâtiments et personnes) tous volumes confondus, pour différents scénarios de réduction du risque. La valeur économique d'une vie humaine a été fixée à 106 €.

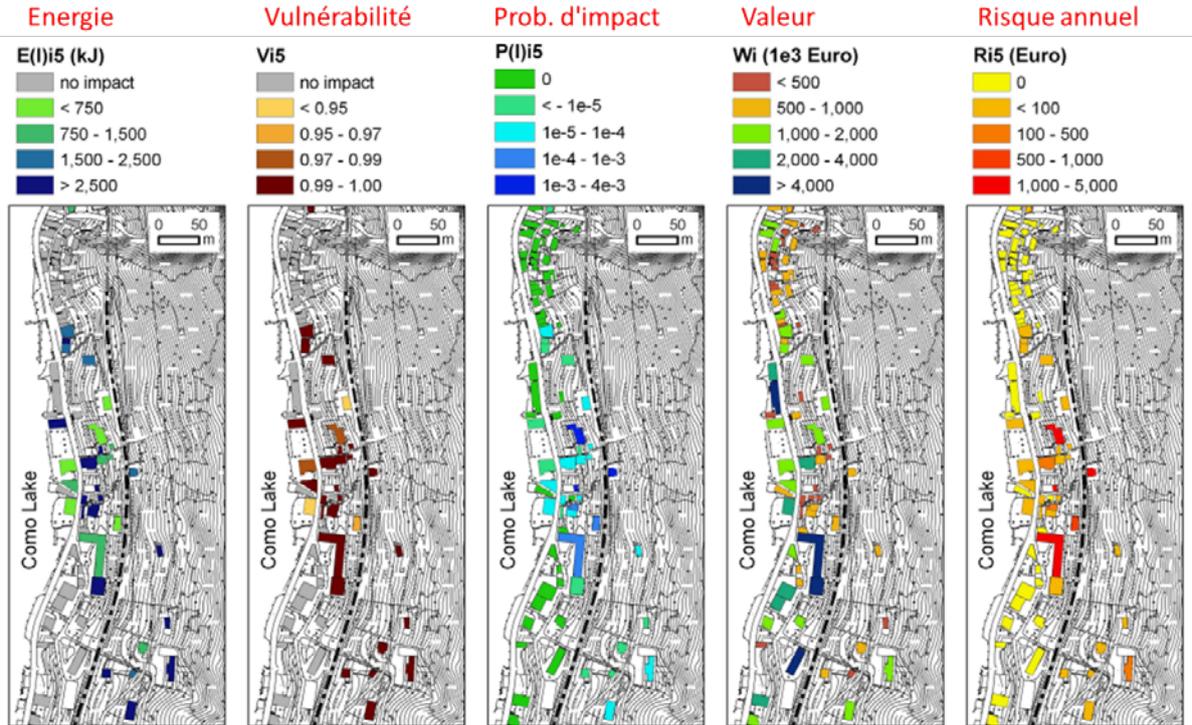


Figure 5.9 : Energie, vulnérabilité, probabilité d'impact, valeur et risque pour les bâtiments, pour les chutes de 10 à 100 m<sup>3</sup> et sans ouvrages de protection (Agliardi et al., 2009)

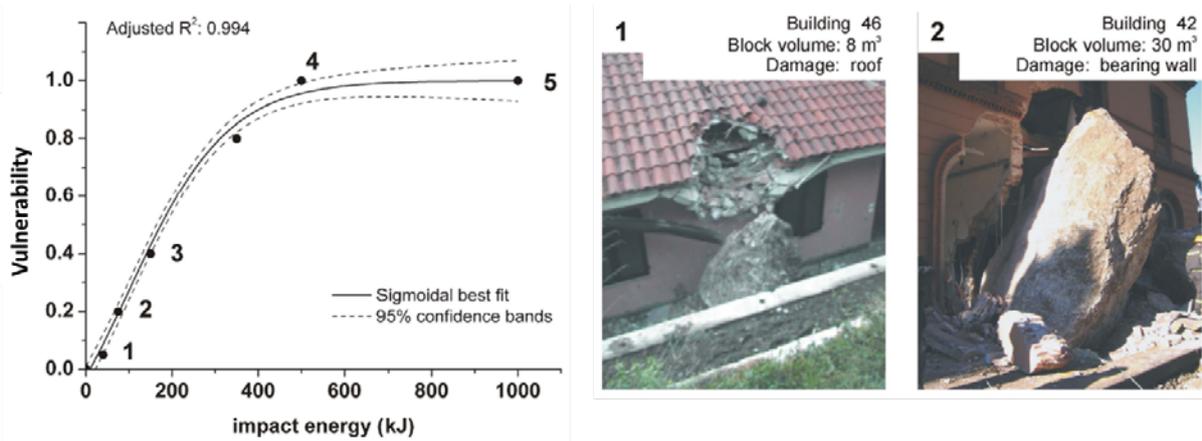


Figure 5.10 : Courbe de vulnérabilité en fonction de l'énergie d'impact, établie à partir de dommages observés et de simulations trajectographiques (Agliardi et al., 2009)

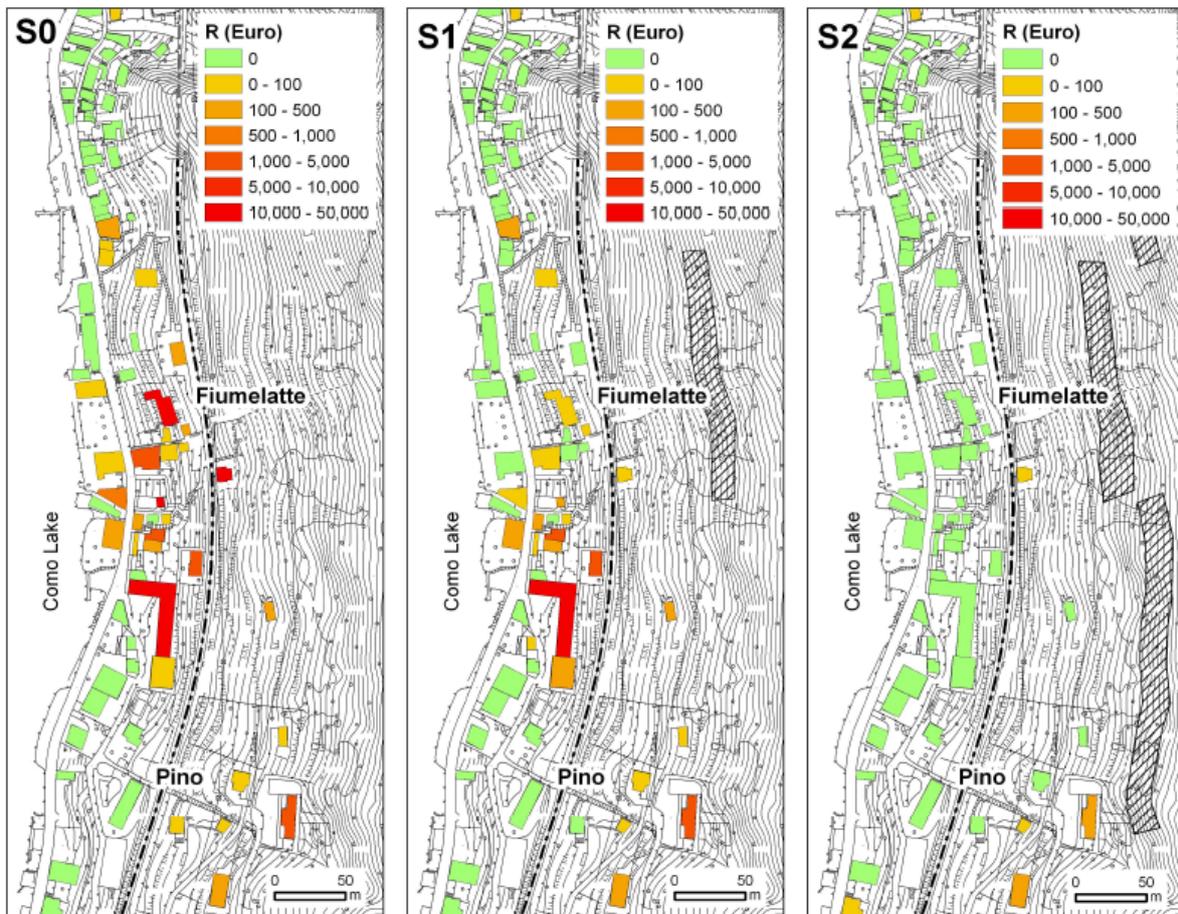


Figure 5.11 : Risque annuel total (bâtiments et personnes) tous volumes confondus, pour différents scénarios de réduction du risque (Agliardi et al., 2009)

#### 5.2.4. Fréquence de départ des blocs estimée à partir des impacts sur les arbres et d'un relevé des blocs déposés sur le versant

Moos et al. (2017) présentent une méthode qui combine la mesure des blocs déposés et l'observation des impacts sur les arbres, dans le cas d'une falaise calcaire de 275 m de longueur et 200 m de hauteur, située dans le Jura suisse. La mesure des volumes des blocs déposés permet d'ajuster une loi de distribution des volumes (fréquence relative) qui peut être extrapolée vers des volumes plus petits. Pour passer de la fréquence relative à la fréquence temporelle, on utilise le nombre d'impacts sur les arbres, survenus pendant une durée connue (beaucoup mieux connue que la durée de dépôt des blocs).

Ainsi, les dommages d'étendue supérieure à 3 cm ont été relevés sur 173 arbres. Connaissant la durée de visibilité des dommages, on peut en déduire la fréquence temporelle des blocs de volume supérieur à 0,001 m<sup>3</sup> (volume minimal provoquant des dommages de plus de 3 cm). Elle est d'environ 228 blocs par an, mais pour l'analyse du risque, il est nécessaire de connaître la distribution des volumes de ces blocs pour les volumes supérieurs à 0,05 m<sup>3</sup>. Pour cela, les volumes de 209 blocs relativement récents (frais ou légèrement moussus) ont été mesurés (Figure 5.12a). Comme seuls les volumes supérieurs à 0,05 m<sup>3</sup> ont été mesurés, une loi de distribution a été ajustée afin de permettre une extrapolation vers les volumes plus petits (et éventuellement plus grands). Selon cette loi, les blocs de volume supérieur à 0,05 m<sup>3</sup> ne représentent que 1,7 % des blocs de volume supérieur à 0,001 m<sup>3</sup>. Leur fréquence est donc de 3,8 blocs par an. On peut en conclure que la période durant laquelle les blocs mesurés se sont déposés est de 53 ans. En divisant les nombres de blocs de la figure par cette durée, on obtient la fréquence temporelle de départ des blocs en fonction du volume (Figure 5.12b).

A partir de ces fréquences de départ, une simulation trajectographique (logiciel RockyFor3D) permet de déterminer les fréquences d'atteinte, nécessaires à l'analyse du risque.

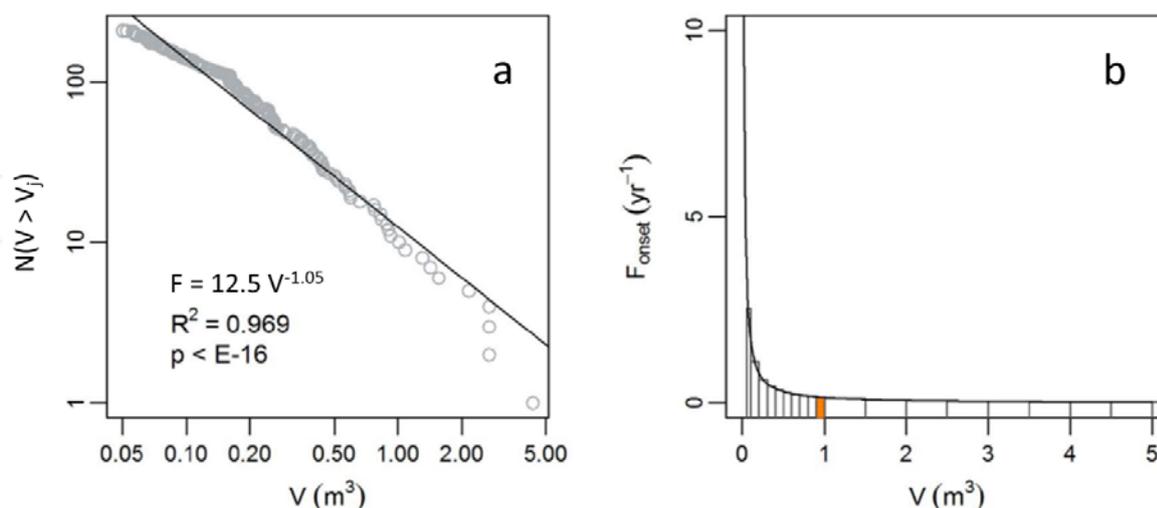


Figure 5.12 : (a) Distribution cumulée des volumes des 209 blocs mesurés et ajustement par une loi puissance. (b) Fréquence temporelle (cumulée) de départ des blocs en fonction du volume (d'après Moos et al., 2017)

### 5.2.5. Méthode simplifiée pour estimer la fréquence de départ des blocs

Une estimation rapide de la fréquence de départ des blocs peut être effectuée en utilisant les connaissances acquises dans le projet C2ROP sur la fréquence de départ des éboulements.

Les mesures topographiques diachroniques effectuées sur différentes falaises de moyenne montagne (sans permafrost), montrent que le nombre annuel d'éboulements de plus de  $1 m^3$  par  $hm^2$  de falaise (paramètre d'activité  $A_{st}$ ) varie entre  $10^{-2}$  et 1 selon l'espacement entre discontinuités et l'altitude de la falaise (rapport C2ROP, action A1.1).

Ces mesures ont également montré que si le volume minimal considéré ( $V$ ) augmente, la diminution de la fréquence spatio-temporelle peut être décrite par une loi puissance (Figure 5.13), dont l'exposant  $-B$  reflète l'homogénéité des volumes éboulés. Le paramètre  $B$  varie entre 0,3 à 1 selon la structure du massif rocheux. La figure ci-dessous permet à l'expert d'évaluer les paramètres  $A_{st}$  et  $B$ . L'incertitude sur  $A$  (et donc sur les fréquences) peut être d'un facteur 10, mais cela constitue malgré tout un progrès important par rapport aux méthodes qualitatives où la signification des termes forte, moyenne ou faible était souvent très vague.

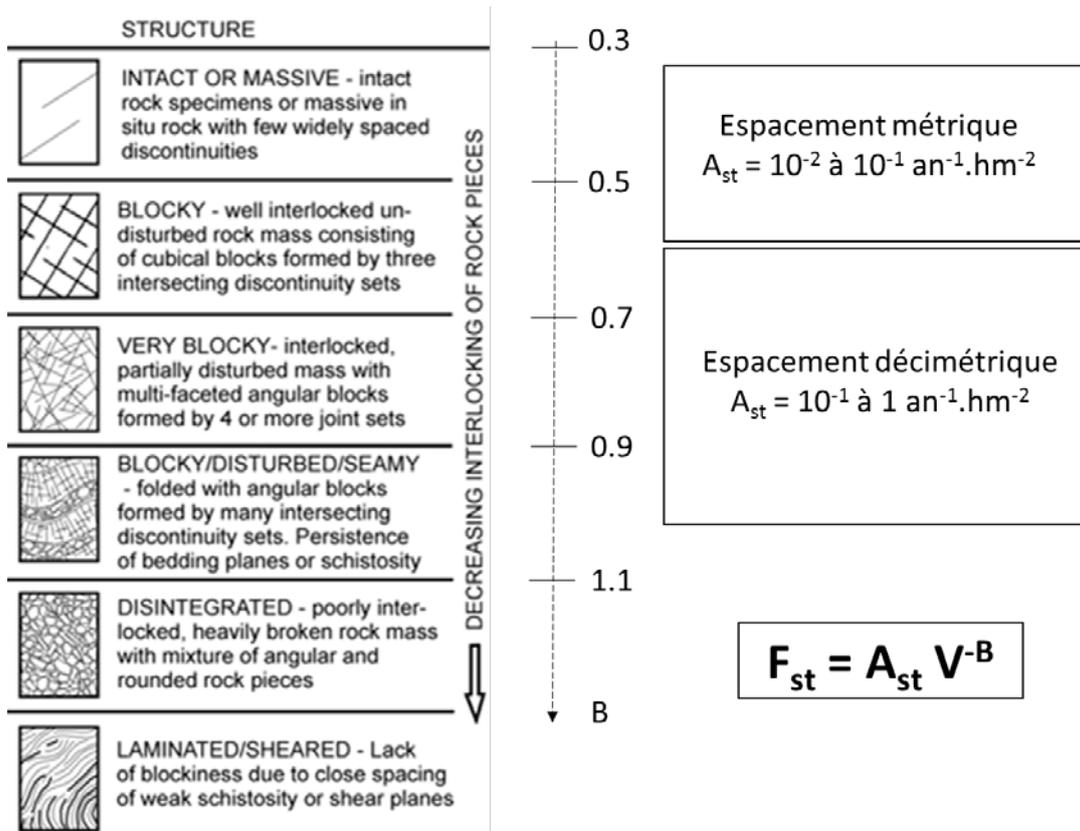


Figure 5.13 : Paramètres de la loi puissance décrivant la fréquence spatio-temporelle d'éboulements :  $F_{st} = A_{st} V^{-B}$  où  $V$  est le volume minimal d'éboulement considéré. Structure d'après Hoek et Brown (Hoek, 2007)

Sur cette base, la somme des volumes éboulés par unité de temps et par unité de surface de falaise, entre deux valeurs  $V_1$  et  $V_2$  du volume, s'obtient par intégration de la relation fréquence-volume (Figure 5.14). Pour  $B \neq 1$  :

$$W = \int_{F_2}^{F_1} V dF = \frac{A_{st} B}{(1-B)} [V_2^{(1-B)} - V_1^{(1-B)}] \quad (5.1)$$

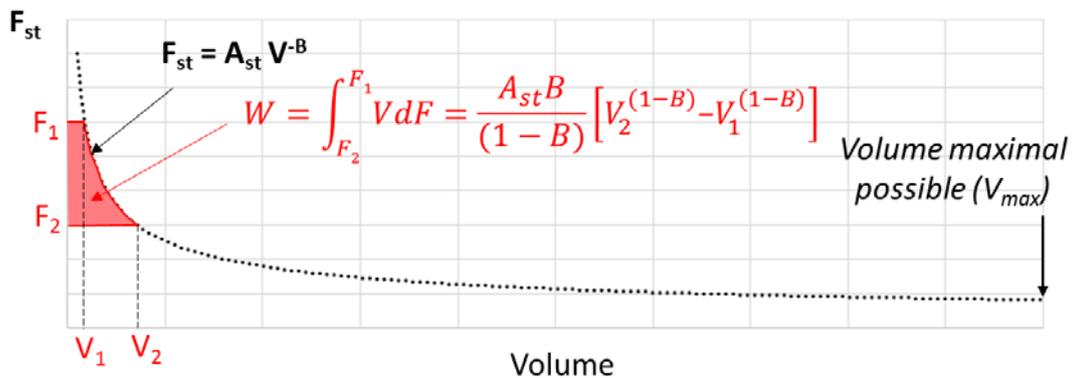


Figure 5.14 : Détermination du taux d'érosion linéaire pour des volumes de chute compris entre  $V_1$  et  $V_2$

Si  $V_2$  est le volume maximal possible d'éboulement (qui dépend notamment de la hauteur de la falaise) l'expression devient :

$$W = \int_{F_2}^{F_1} V dF = \frac{A_{st} B}{(1-B)} [V_2^{(1-B)} - V_1^{(1-B)}] + A_{st} V_2^{(1-B)} = \frac{A_{st}}{(1-B)} V_2^{(1-B)} - \frac{A_{st} B}{(1-B)} V_1^{(1-B)} \quad (5.2)$$

Elle correspond au taux d'érosion de la falaise (vitesse de recul perpendiculairement à la surface) dû aux éboulements de volume supérieur à  $V_1$  (Figure 5.15).

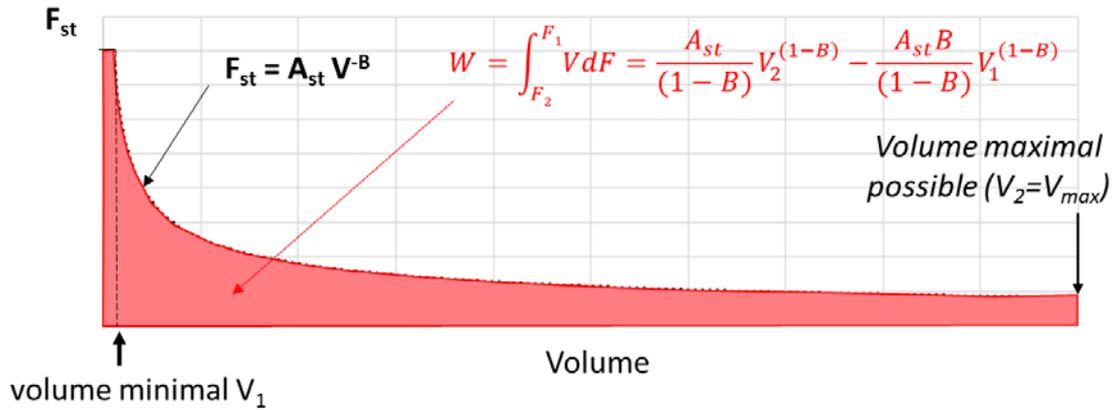


Figure 5.15 : Détermination du taux d'érosion linéaire pour des volumes de chute compris entre  $V_1$  et le volume maximal possible  $V_{max}=V_2$

En pratique, on traite différemment les éboulements sans interaction et les éboulements avec interaction entre les éléments rocheux, car les méthodes utilisées pour la simulation des trajectoires sont différentes. On considère donc séparément les volumes éboulés avec et sans interaction, ce qui nécessite de fixer un volume limite entre les deux. La limite entre les deux types d'éboulement étant assez floue, il n'existe pas de valeur limite universellement admise (elle dépend notamment de la taille des éléments rocheux). La valeur de 10 000 m<sup>3</sup> est suggérée par défaut.

La méthode présentée ici se limite aux éboulements sans interaction. Les éboulements avec interaction, de volume plus important, sont généralement considérés dans le cadre d'une étude d'aléas localisés, plutôt que d'aléa diffus.

Ce volume total des éboulements sans interaction est constitué d'éléments rocheux de différents volumes ( $v$ ), dont la distribution peut également être modélisée par une loi puissance, mais avec des valeurs des paramètres qui sont différentes de celles de la distribution des volumes d'éboulements. La fréquence spatio-temporelle des éléments rocheux peut ainsi s'écrire :

$$f_{st} = a_{st} v^{-b} \quad (5.3)$$

où  $v$  est le volume élémentaire minimal considéré.

Le volume total éboulé  $W$  peut s'exprimer également en fonction des paramètres  $a_{st}$ ,  $b$ ,  $v_1$  et  $v_2$ .

Le volume élémentaire minimal à considérer et le volume maximal possible d'un élément rocheux sont fixés par l'expert.

Pour  $b \neq 1$  :

$$W' = \int_{f_2}^{f_1} v dF = \frac{a_{st} b}{(1-b)} [v_2^{(1-b)} - v_1^{(1-b)}] + a v_2^{(1-b)} = \frac{a_{st}}{(1-b)} v_2^{(1-b)} - \frac{a_{st} b}{(1-b)} v_1^{(1-b)} \quad (5.4)$$

Les différentes études effectuées sur des volumes élémentaires supérieurs à 0,1 m<sup>3</sup> ont donné des valeurs de  $b$  comprises entre 0,5 et 1,5. Dans la méthode simplifiée proposée, nous adopterons pour  $b$  la valeur moyenne de 1. L'expression de  $W'$  devient alors :

$$W' = a_{st} \left( \ln \frac{v_2}{v_1} + 1 \right) \quad (5.5)$$

En égalisant les expressions de  $W$  et  $W'$  et en fixant le volume maximal possible d'un bloc ( $v_2$ ), on obtient le paramètre  $a_{st}$  et donc l'expression de la fréquence des éléments rocheux en fonction du volume minimal considéré. Une simple feuille de calcul permet d'obtenir les fréquences de départ correspondant aux classes de volume choisies.

Ces valeurs peuvent alors servir de données d'entrée à une étude de la propagation, qui permettra d'estimer les fréquences d'atteinte de différents points du versant étudié (nombre de blocs par an et par mètre de largeur). L'étude de la propagation peut se faire par simulation des trajectoires, par la méthode de l'angle d'énergie ou à dire d'expert.

### 5.3. Cas des inventaires comportant peu d'évènements

Notons qu'un faible nombre d'évènements d'une certaine taille ne devrait pas empêcher d'estimer la fréquence de rupture ou d'atteinte, même si l'incertitude est grande.

En admettant que le nombre de chutes sur une certaine durée est régi par la loi de Poisson (Rat, 2006), si dans une plage de volume, on n'observe qu'un évènement sur une certaine durée, on peut en conclure avec, par exemple, un niveau de confiance de 95 % que l'espérance de ce nombre est supérieure à 0,025 et inférieure à 5,6. Ceci donne un facteur d'incertitude de 15 si l'on choisit la moyenne géométrique de ces deux valeurs pour caractériser la fréquence de chute (le facteur d'incertitude est le rapport entre la moyenne géométrique et la limite inférieure ou supérieure). Si l'on observe 10 évènements, on peut en conclure que le nombre moyen de chutes est compris entre 5 et 18. Le facteur d'incertitude sur la fréquence n'est plus que de 2, valeur acceptable si l'on vise un facteur d'incertitude inférieur à 10 sur l'aléa résultant. Si l'on n'observe aucun éboulement, on peut en conclure que le nombre moyen est compris entre 0 et 3. On obtient alors une limite supérieure pour la fréquence de chute.

Les Tableaux 5.4 et 5.5 donnent respectivement les intervalles de confiance à 95 % et 99 % du nombre moyen de chutes sur une certaine durée et le facteur d'incertitude associé, en fonction du nombre observé sur la période d'observation. La durée considérée doit être suffisante pour prendre en compte la variabilité interannuelle du climat.

Notons que si dans une approche conservative, on ne cherche pas un intervalle de confiance mais une valeur par excès, les limites supérieures des tableaux 5.4 et 5.5 correspondent respectivement à des probabilités de dépassement de 2,5 % et 0,5 %.

Nombre observé	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Limite inférieure	0	0,025	0,24	0,62	1,1	1,6	2,2	2,8	3,4	4,1	4,8
Limite supérieure	3	5,6	7,2	8,8	10,3	11,7	13,1	14,4	15,8	17,1	18,4
Moyenne géométrique		0,4	1,3	2,3	3,4	4,3	5,3	6,3	7,3	8,3	9,4
Facteur d'incertitude		15,0	5,5	3,8	3,1	2,7	2,4	2,3	2,2	2,0	2,0

Tableau 5.4 : Intervalle de confiance à 95 % de l'espérance (nombre moyen) du nombre de chutes sur une certaine durée, en fonction du nombre observé pour la période d'observation (loi de Poisson) ; moyenne géométrique de ces limites et facteur d'incertitude (rapport entre la moyenne géométrique et la limite inférieure ou supérieure)

Nombre observé	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Limite inférieure	0	0,005	0,1	0,34	0,67	1,1	1,55	2	2,6	3,1	3,7
Limite supérieure	5	7,4	9,4	11	12,5	14,1	15,7	17	18,5	20	21,5
Moyenne géométrique		0,2	1,0	1,9	2,9	3,9	4,9	5,8	6,9	7,9	8,9
Facteur d'incertitude		38,5	9,7	5,7	4,3	3,6	3,2	2,9	2,7	2,5	2,4

Tableau 5.5 : Intervalle de confiance à 99 % de l'espérance (nombre moyen) du nombre de chutes sur une certaine durée, en fonction du nombre observé pour la période d'observation (loi de Poisson) ; moyenne géométrique de ces limites et facteur d'incertitude (rapport entre la moyenne géométrique et la limite inférieure ou supérieure)

# Chapitre 6 - Caractérisation qualitative d'un aléa diffus

Pour caractériser l'aléa résultant dans une zone menacée, il faut estimer la fréquence de rupture dans la zone de départ, pour une plage de volume donnée (ou une relation fréquence- volume), la probabilité de propagation jusqu'à cette zone en fonction de l'énergie et en déduire la fréquence d'atteinte en fonction de l'énergie. L'énergie peut ne pas être considérée. Toute méthode qui ne quantifie pas ces trois paramètres est qualifiée de qualitative. C'est le cas de la plupart des méthodes encore utilisées actuellement.

## 6.1. Méthodes utilisant un système de notation

Ferrari et al. (2016) ont recensé et comparé 17 méthodes d'évaluation qualitative de l'aléa éboulement, utilisées en Amérique du Nord et en Europe, dans lesquelles l'aléa résultant est qualifié en utilisant un système de notation de différents paramètres influents.

L'objectif final de ces études étant d'évaluer le risque, de nombreuses méthodes ne caractérisent pas séparément l'aléa. Sur les 17 méthodes présentées, 9 ont été développées pour des routes et 5 pour des pentes naturelles (information non précisée clairement pour les 3 autres). Les volumes de blocs maximaux considérés sont de quelques m<sup>3</sup>.

La qualification globale de l'aléa de départ intègre théoriquement le volume et la fréquence. Mais celle-ci ne pouvant généralement pas être déterminée de manière suffisamment précise du fait de l'absence d'inventaire historique, son estimation prend en compte les facteurs de prédisposition internes (relatifs au massif rocheux) et parfois aussi externes (pluie, gel-dégel, sismicité). Ces derniers sont moins souvent utilisés (7 méthodes sur 17), car les études ont généralement pour but de comparer des zones situées dans une région où les conditions climatiques et sismiques sont relativement homogènes.

L'ensemble des paramètres utilisés pour caractériser l'aléa résultant peuvent être regroupés en 5 catégories :

- a) les paramètres relatifs à la fréquence de chute observée ;
- b) les paramètres de prédisposition internes (géologiques) ;
- c) les paramètres de prédisposition externes ;
- d) les paramètres caractérisant l'intensité de l'aléa résultant (volume des blocs individuels et parfois également celui des événements) ;
- e) les paramètres caractérisant la propagation (hauteur, pente, nature, rugosité du versant, végétation, etc.).

A titre d'exemple, le Tableau 6.1 illustre la méthode RHR (Rockfall Hazard Rating System), une des plus anciennes et des plus utilisées, préconisée notamment par Wyllie (2015) et qui a donné lieu à de nombreuses variantes. Malgré son nom («Hazard»), elle couvre également l'évaluation du risque. Les paramètres relatifs au risque sont donnés pour information.

### Commentaires

*Le Slope Mass Rating ou SMR (Romana et al., 2003), souvent utilisé dans le dimensionnement des déblais, est utilisé dans deux des 17 méthodes comme paramètre de prédisposition interne, mais il ne peut pas être utilisé seul car il ne prend pas en compte (ou très peu) les paramètres externes qui dégradent le massif et provoquent les éboulements.*

Category	Hazard-rating criteria and scores			
	Points 3	Points 9	Points 27	Points 81
1. Slope height (m)	7.5 m (25 ft)	15 m (50 ft)	23 m (75 ft)	30 m (100 ft)
<b>2. Geologic character</b>				
<i>Case 1</i>				
Structural condition	Discontinuous joints, favorable orientation	Discontinuous joints, random orientation	Continuous joints, adverse orientation	Continuous joints, adverse orientation
Rock friction	Rough, irregular	Undulating	Planar	Clay infilling, or slickensided
<i>Case 2</i>				
Structural condition	Few differential erosion features	Occasional erosion features	Many erosion features	Major erosion features
Difference in erosion rates	Small difference	Moderate difference	Large difference	Extreme difference
3. Block size	0.3 m (1 ft)	0.6 m (2 ft)	1.0 m (3.3 ft)	1.2 m (4 ft)
Quantity of rock fall event	3 m <sup>3</sup> (4 yd <sup>3</sup> )	6 m <sup>3</sup> (8 yd <sup>3</sup> )	9 m <sup>3</sup> (12 yd <sup>3</sup> )	12 m <sup>3</sup> (16 yd <sup>3</sup> )
4. Climate and presence of water on slope	Low to moderate precipitation; no freezing periods, no water on slope	Moderate precipitation, or short freezing periods, or intermittent water on slope	High precipitation or long freezing periods, or continual water on slope	High precipitation and long freezing periods, or continual water on slope and long freezing periods
5. Rock fall history	Few falls	Occasional falls	Many falls	Constant falls
Category	Risk-factor rating criteria and scores			
	Points 3	Points 9	Points 27	Points 81
1. Ditch effectiveness	Good catchment	Moderate catchment	Limited catchment	No catchment
2. Average vehicle risk (% of time)	25% of the time	50% of the time	75% of the time	100% of the time
3. Percentage of decision sight distance (% of design value)	Adequate sight distance, 100% of design value	Moderate sight distance, 80% of the design value	Limited sight distance, 60% of design value	Very limited sight distance, 40% of design value
4. Roadway width including paved shoulders (m)	13.5 m (44 ft)	11 m (36 ft)	8.5 m (28 ft)	6 m (20 ft)

Tableau 6.1 : Paramètres de la méthode RHRS (d'après Wyllie, 2015). Case 1: "Structurally controlled rockfalls". Case 2 : "Rockfall activity is controlled by differential erosion"

## 6.2. Recommandations françaises

En France, il existe deux guides relatifs à l'aléa rocheux diffus et au risque associé : le guide pratique versants rocheux (MEDE, 2015) destiné aux décideurs, et le guide méthodologique PPR mouvements de terrain (MATE/METL, 1999). En complément, en 2013, le METS a sollicité un groupe de travail (GT) pour la révision des PPR en zone de montagne. Ce GT a formulé en 2015 des recommandations pour la prise en compte de l'aléa rocheux dans les PPR (Points-clés pour la révision des guides méthodologiques des plans de prévention des risques naturels de montagne. Comité technique n° 1 « La détermination des aléas et la place de la modélisation »). Enfin depuis 2014, un GT (MEZAP) s'attache à formaliser une méthode pour réaliser les cartes d'aléa éboulement rocheux pour les PPRn et/ou les PAC (porter à connaissance). Pour les études d'itinéraires, le guide technique du LCPC n'aborde que brièvement les études d'aléa diffus (qualifiées d'études générales), car il est consacré aux études d'aléas localisés (qualifiées d'études spécifiques). Il sera donc évoqué au chapitre 7.

### 6.2.1. Guide pratique versant rocheux

Le guide pratique versant rocheux concerne *a priori* aussi bien les études de type PPR que les études spécifiques. On y retrouve les cinq catégories de paramètres à considérer pour caractériser l'aléa (relatifs à la fréquence ou la probabilité de chute, la prédisposition interne, la prédisposition externe, la propagation et l'intensité de l'aléa résultant). Cependant, l'approche historique n'y est pas évoquée pour estimer la fréquence des chutes. Seuls sont utilisés des paramètres reflétant l'activité éventuelle d'un versant rocheux (déformations, intensité des facteurs déclenchants), afin d'estimer le délai avant rupture d'un compartiment. Les paramètres de prédisposition internes sont utilisés pour estimer une probabilité d'occurrence indépendante du délai. La combinaison du délai et de cette probabilité caractérise l'aléa de départ. L'aléa résultant est obtenu en croisant celui-ci avec la probabilité de propagation. Enfin, un niveau d'aléa intégrant la probabilité d'atteinte et l'intensité peut être déterminé. L'intensité est exprimée en termes de volume ou d'énergie.

En conclusion, le guide semble mieux adapté aux études d'aléas localisés que d'aléas diffus car il ne mentionne pas la notion de fréquence de chute, ni l'approche historique. Cependant une étude d'aléas localisés devrait considérer le contexte d'aléa diffus dans lequel elle se situe.

## 6.2.2. Guide méthodologique PPRN, risque mouvements de terrain

### Présentation

Les guides PPRN ont pour objet l'élaboration des plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPRN), qui visent «à éviter une aggravation de l'exposition des personnes et des biens aux risques naturels et à réduire leurs conséquences négatives sur les vies humaines, l'environnement, l'activité économique et le patrimoine culturel» (MEEM/MLHD, 2016). Il existe un guide général (MEEM/MLHD, 2016) concernant les inondations, les mouvements de terrain, les avalanches, les incendies de forêt, les séismes, les éruptions volcaniques, les tempêtes ou les cyclones. Un guide est consacré aux mouvements de terrain dans leur ensemble (MATE/METL, 1999) : affaissements et effondrements ; tassements par retrait ; éboulements, chutes de blocs et de pierres ; glissements, coulées de boue associées et fluages. Il n'existe pas de guide spécifique pour les éboulements, mais un groupe de travail a été chargé d'en établir un (MEDD/MEZAP, 2013).

Dans le guide PPR mouvements de terrain, on retrouve les cinq catégories de paramètres à considérer pour caractériser l'aléa (paragraphe 8.1). Contrairement aux méthodes évoquées précédemment, les paramètres ne sont pas quantifiés et les paramètres synthétiques utilisés (fréquence, intensité) sont qualifiés à dire d'expert.

La prise en compte des paramètres de prédisposition internes («de site» ou «intrinsèques») et externes («déclenchants») est préconisée (p. 25 et 28). Les paramètres de prédisposition internes sont détaillés pour les falaises rocheuses dans le document 2 de la page 28. Les paramètres relatifs à la propagation y sont mentionnés sans être détaillés. Concernant l'intensité du phénomène, ce n'est pas le volume ni l'énergie qui sont privilégiés, mais plutôt l'importance des parades nécessaires pour se prémunir de l'aléa (p. 29), ainsi que la gravité en termes de préjudices humains potentiels (p. 31). L'intensité faible correspond à quelques blocs potentiellement instables que l'on peut purger, l'intensité forte à un pan de falaise instable qu'il est nécessaire de conforter. Une gravité moyenne correspond à un phénomène pouvant faire une victime (par exemple, une chute de pierres), une gravité forte à quelques victimes (chute de blocs) et une gravité majeure à quelques dizaines de victimes (éboulement en masse).

L'estimation de la fréquence de chute joue un rôle important :

- « la connaissance des phénomènes historiques ... constitue une étape essentielle et incontournable de la démarche » (p. 18) ;
- « le mouvement prévisible de référence à prendre en compte pour définir le zonage (entre zones constructibles ou non) est conventionnellement le plus fort événement historique connu dans le site ... en l'absence d'éléments identifiés sur le site, on se basera soit sur le plus fort événement potentiel vraisemblable à échelle centennale ou plus en cas de danger humain soit sur le plus fort événement historique observé dans un secteur proche, présentant une configuration similaire au plan géologique, géomorphologique, hydrologique et structural » (p. 24).

### Risque accepté dans les PPRN

Dans le langage courant, les qualificatifs « faible » ou « élevé » n'ont pas de signification quantitative, ils expriment simplement une impression subjective. Pour qu'une étude limitée à la caractérisation de l'aléa soit traçable et reproductible, il est nécessaire de donner une signification quantitative, même approximative, aux qualificatifs utilisés.

Dans les PPR, qui ne se limitent pas à une étude d'aléa, la probabilité ou la fréquence d'un phénomène est qualifiée d'élevée si elle induit un risque potentiel considéré comme inacceptable. Cela signifie qu'une évaluation qualitative de l'aléa ne peut se faire sans considérer de critère d'acceptabilité du risque. Comme il n'existe pas de guide spécifique pour les éboulements, nous présentons ci-dessous les critères préconisés pour les séismes et les inondations, en nous intéressant particulièrement au risque humain, et la pratique actuelle pour les chutes de blocs.

### Risque sismique

Les règles les plus précises pour la prévention des risques naturels sont probablement les règles parasismiques. Dans le cas des séismes, qui affectent des territoires entiers (souvent plusieurs communes), les plans de prévention n'interdisent pas les constructions, mais les adaptent pour résister à une accélération sismique de période de retour 475 ans (pour les bâtiments de catégorie 2), qui correspond à une fréquence annuelle d'environ 0,002. Autrement dit, on admet que le séisme de référence se produise en moyenne tous les 475 ans. Si le dépassement de l'accélération de période 475 ans entraînait systématiquement le décès des habitants, le risque humain individuel (probabilité annuelle de décès) serait de l'ordre de 0,002, ce qui est nettement supérieur aux valeurs considérées comme acceptables pour les risques naturels (10<sup>-5</sup> ou 10<sup>-6</sup>). En réalité, le pourcentage de décès sachant que l'accélération de référence est dépassée, est de l'ordre de 0,1 % dans une zone de sismicité modérée, comme le montre l'étude de risque de Dunant et al. (2012) qui aboutit à une estimation du risque humain individuel de l'ordre de 10<sup>-6</sup> pour la ville de Grenoble. Quant au risque sociétal (nombre annuel de décès), il dépend en plus, du nombre d'habitants concernés, donc de l'étendue de la zone considérée et de la densité de population.

### **Risque inondation**

Pour les inondations, le paramètre d'intensité est souvent la hauteur d'eau. Dans ce cas, la zone d'aléa fort est la zone où cette hauteur dépasse un mètre (phénomène de référence) avec une période de retour inférieure à 100 ans. La probabilité annuelle qu'un individu particulier habitant dans la zone autorisée, subisse ce phénomène de référence est donc inférieure à 0,01. L'examen des dommages provoqués par les inondations de ces dernières années en France laisse penser que le pourcentage de décès dans la population sinistrée pourrait être de l'ordre de 0,1 %. Avec ce pourcentage, le risque humain serait donc inférieur à  $10^{-5}$ , valeur pouvant être considérée comme acceptable. Le risque matériel sociétal se traduit par l'endommagement de nombreuses habitations (parfois la destruction).

### **Risque chute de blocs**

Pour les PPR chutes de blocs, le paramètre d'intensité qui est le plus utilisé est le volume, avec une valeur critique (de référence) généralement de  $1 \text{ m}^3$ . Alors que l'emprise d'un séisme ou d'une inondation s'étend généralement sur plusieurs communes, celle d'une chute de bloc représente un couloir de largeur métrique. Contrairement au cas des séismes ou des inondations, la période de retour d'un bloc sur un habitant est donc beaucoup plus longue que sur la commune ou le bassin de risque. Pour les chutes de blocs, il convient donc de bien distinguer les périodes de retour (ou les fréquences) à l'échelle d'un individu (métrique) et à l'échelle de la zone d'étude (souvent kilométrique).

Si l'on admet que l'impact d'un bloc d' $1 \text{ m}^3$  sur un individu (dans sa maison ou à l'extérieur) est mortel, sa probabilité annuelle de décès est en première approximation, égale à la fréquence d'atteinte de l'emprise qu'il occupe (environ un mètre), donc à la fréquence d'atteinte par mètre de largeur. La valeur acceptable (de référence) de la fréquence d'atteinte serait donc de  $10^{-5}$  ou  $10^{-6} \text{ an}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ , ce qui correspond à une période de retour de référence de  $10^5$  ou  $10^6$  ans. Cette période est logiquement plus longue que celle adoptée pour les séismes ou les inondations, car le risque humain pour un individu est beaucoup plus grand lorsqu'il est atteint par un bloc d' $1 \text{ m}^3$  que lorsque sa maison est inondée ou subit un séisme.

C'est pourtant une période de référence centennale qui est généralement considérée dans la pratique pour les PPR, mais il s'agit de la période de retour globale (à l'échelle de la commune ou du bassin de risque).

Or il se trouve que les communes s'étendent généralement sur un à quelques km. Une fréquence globale de  $10^{-2} \text{ an}^{-1}$  sur une zone d'aléa diffus relativement homogène correspond à une fréquence spatio-temporelle de  $10^{-5} \text{ an}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  si la zone s'étend sur 1 km ou de  $10^{-6} \text{ an}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$  si elle s'étend sur 10 km. L'application d'une période de retour de référence centennale à l'échelle communale conduit donc à un risque individuel humain acceptable, du moins tant que l'étendue de la zone d'étude est comprise entre 1 et 10 km. La méthode n'est cependant pas satisfaisante car elle conduit à mieux protéger les habitants des communes les plus étendues.

Dans la pratique actuelle, la fréquence de départ est rarement prise en compte explicitement dans l'estimation de l'aléa résultant. Lorsqu'une probabilité de propagation est quantifiée, la limite de la zone constructible correspond souvent à une probabilité de propagation de l'ordre de  $10^{-5}$ . Comme la fréquence de départ par mètre des blocs de  $1 \text{ m}^3$  est toujours nettement inférieure à 1, la fréquence d'atteinte est toujours largement inférieure à  $10^{-5}$  et le risque associé est acceptable.

Les PPRN visent également à limiter le risque pour les habitations. Leur largeur étant environ 10 fois celle d'un individu, leur fréquence d'atteinte est également 10 fois plus élevée, donc d'environ  $10^{-4}$  au maximum (période de retour 10 000 ans). Cette période de retour paraît acceptable en comparaison de celles retenues pour les séismes (475 ans) et pour les inondations (100 ans).

### **Synthèse des pratiques départementales en matière de qualification de l'aléa de chute de blocs dans les PPRN**

Un état des lieux a été réalisé au 30/08/2018 par D. Mazet-Brachet, à partir :

- d'une cinquantaine de CCTP (cahier des clauses techniques particulières) récents pour des PPRN mouvements de terrain ou multirisques prenant en compte les aléas de chute de blocs ;
- d'une centaine de PPRN mouvements de terrain ou multirisques prenant en compte les aléas de chute de blocs, notamment sur les départements pour lesquels aucun CCTP n'était disponible ;
- de la consultation téléphonique d'une trentaine de DDT (direction départementale des territoires), de DREAL (direction régionale de l'environnement de l'aménagement et du logement) et du BRGM (bureau de recherches géologiques et minières).

Il ressort que 37 départements français sur 102 ne disposent d'aucun PPRN « Chute de blocs ». Sur les 65 départements restants, une très grande majorité (60) font référence au guide méthodologie PPR « Mouvements de terrain » et seulement 2 au guide pratique « Versants rocheux » de 2014 de la DGPR.

Les attentes exprimées dans les CCTP en ce qui concerne la qualification de l'aléa de chute de blocs, ou, à défaut de CCTP, les méthodes mises en œuvre dans les PPRN récents consultés, présentent très peu d'homogénéité dans les critères retenus d'un département à l'autre et ces critères semblent plus liés à une pratique du bureau d'études qu'à une exigence du donneur d'ordre.

Dès lors que la volonté du MOA est peu marquée, le prestataire du PPRN met souvent en œuvre une cartographie « à dire d'expert », ce qui rend souvent les modalités de qualification de l'aléa peu traçables et surtout peu reproductibles, car largement subjectives, et pose des problèmes juridiques potentiels (rupture de l'égalité de traitement entre les citoyens). Cela a été le cas pour 28 départements sur 65, soit 43 % des PPRN consultés. Quelques départements, peu nombreux encore, ont des exigences plus affirmées sur leurs attentes en matière de qualification de l'aléa de chute de blocs.

Il est fait de plus en plus référence à la méthode des cônes sans citer MEZAP (6 départements), à la méthode MEZAP (9 départements) ou encore aux techniques de modélisation 2D ou 3D (8 départements). Le département de la Savoie utilise la méthode MEZAP en la complétant de manière à obtenir une carte d'aléa contenant plus d'information (DDT73, >2016).

### 6.2.3. Proposition du groupe de travail MEZAP

La note MEZAP (à paraître en 2020) propose une méthodologie de cartographie de l'aléa rocheux ayant vocation à être déclinée quel que soit le contexte géomorphologique concerné puisque la définition théorique de l'aléa, défini comme l'occurrence d'un phénomène physique donné, est indépendante des contextes géographiques, géologiques et morphologiques. L'aléa rocheux couvre toute la gamme des phénomènes : de la pierre isolée jusqu'au phénomène de grande ampleur. Les approches et méthodes proposées répondent avant tout aux contraintes de l'Etat qui souhaite conserver une approche proportionnée aux attentes (réglementation en matière d'urbanisme) et aux moyens dédiés à la cartographie de l'aléa rocheux (financiers, humains et temporels). Dans ce contexte, il ne peut être admis de dérouler pour chaque site des approches scientifiques poussées, pour pallier un état des connaissances relatif à la nature de l'aléa rocheux insuffisant. A ce titre, il est proposé une approche pragmatique, de fait facilement reproductible entre sites, pour aboutir in-fine à une qualification de l'aléa rocheux répondant aux objectifs de connaissance de l'exposition aux risques imposés dans le cadre de la réalisation d'un PAC (porter à connaissance) et/ou d'un PPR (Plan de Prévention des risques). La méthode MEZAP a pour vocation d'objectiver les démarches afin de garantir la cohérence des productions d'un territoire à l'autre en disposant d'une base commune de détermination de l'aléa rocheux et d'un vocabulaire commun.

La doctrine PPRN est d'élaborer une cartographie à partir d'un aléa qualifié de référence qui est approché au travers de scénarios. Plusieurs scénarios peuvent être proposés pour construire l'aléa de référence (cas des falaises superposées générant des volumes variés). L'aléa de référence est évalué pour chaque grande zone de départ jugée homogène (versant, falaise) et un (ou des) scénario(s) pour les zones de départ secondaire (petites barres rocheuses isolées, talus routiers, etc.). Par définition l'aléa de référence est caractérisé par le volume du plus gros bloc susceptible de se propager vers les enjeux et issu d'un départ unique ou important se fragmentant.

La méthode MEZAP identifie et propose un traitement spécifique aux phénomènes d'éboulements en masse (ou en grande masse) dont la propagation répond à des processus particuliers, extrêmement complexes (interactions fortes entre blocs, écoulement turbulent) pour lesquels il n'est pas possible de décliner une méthode facilement reproductible.

La note méthodologique MEZAP n'est, au moment de la rédaction de ce rapport, pas finalisée. Une première version (janvier 2014) a été proposée par le groupe de travail. Depuis 2016, des propositions d'évolution sont formulées (INRAE, BRGM). Dans la suite du document, il sera fait référence aux versions 2014 et 2020 non publiée.

#### **Intensité**

Pour la définition de classes d'intensité, la démarche MEZAP se base sur les niveaux d'énergie à l'impact de blocs rocheux sur des bâtiments d'habitation. Les références principales<sup>1</sup> font état de dommages structurels sévères à partir d'une énergie à l'impact de l'ordre de 30 kJ. Ce seuil correspond sensiblement à l'impact d'un bloc cubique de 1 m<sup>3</sup> chutant d'une hauteur de 1 m. A ce titre le volume du mètre cube constitue un seuil dans l'échelle d'intensité.

---

<sup>1</sup> Dont notamment le guide suisse publié par l'association des établissements cantonaux d'assurance incendie en 2005 « Protection des objets contre les dangers naturels gravitationnels ».

Indices d'intensité	Description	Indications sur les dommages
Très légère	Le volume unitaire pouvant se propager est inférieur ou égal à 0,05 m <sup>3</sup>	Peu ou pas de dommage au gros œuvre. Les personnes ne sont généralement pas en danger à l'intérieur des bâtiments, mais le sont à l'extérieur.
Légère	Le volume unitaire pouvant se propager est supérieur à 0,05 m <sup>3</sup> mais inférieur ou égal à 0,25 m <sup>3</sup>	Peu de dommage au gros œuvre. Blessures possibles aux personnes, décès peu probables.
Modérée	Le volume unitaire pouvant se propager est supérieur ou égal à 0,25 m <sup>3</sup> mais inférieur ou égal à 1 m <sup>3</sup>	Dommage au gros œuvre sans ruine. Intégrité structurelle sollicitée. Blessures probables, décès possibles.
Élevée	Le volume unitaire pouvant se propager est supérieur à 1 m <sup>3</sup> mais inférieur ou égal à 10 m <sup>3</sup>	Dommage important au gros œuvre. Ruine probable. Intégrité structurelle remise en cause. Décès possibles.
Très élevée	Le volume unitaire pouvant se propager dépasse 10 m <sup>3</sup>	Destruction du gros œuvre. Ruine certaine. Perte de toute intégrité structurelle. Décès probables.

Tableau 6.2 : Indices d'intensité de l'aléa rocheux en fonction du volume, exemples d'endommagement associé

### Probabilité de départ sur une période de 100 ans

Il est proposé d'apprécier la probabilité de départ sous la forme d'un indice d'activité pour l'aléa de référence considéré. Les approches quantifiées plus développées telles que des analyses de fréquence annuelle, si elles existent, pourront être déclinées sous la forme de cet indice.

Indice d'activité par zone d'homogène	Description
Faible	De l'ordre d'un bloc correspondant à l'aléa de référence tous les 100 ans
Moyen	De l'ordre d'un bloc correspondant à l'aléa de référence tous les 10 ans
Fort	De l'ordre d'un bloc correspondant à l'aléa de référence tous les ans

Tableau 6.3 : Définition de la probabilité de départ par un indice d'activité

Comme pour l'intensité de phénomène, cet indice d'activité doit être justifié au regard en particulier des chroniques évènementielles. La MEZAP souligne la nécessité d'une approche historique, étayée par la consultation d'archives : archives communales, paroissiales, sources départementales – directions des routes des Conseils Départementaux, RTM, DDT, DREAL, etc., documents de bureaux d'études, travaux de recherche, bases de données (BD RTM, BDMVT, BD IRMA), plans, cartes, photographies aériennes, témoignages oraux, enquête de terrain. Pour accroître l'information sur les événements historiques, il est également précisé qu'il peut être nécessaire d'étendre les investigations au-delà du périmètre d'étude, en analysant les phénomènes redoutés à l'échelle de l'unité physique concernée par leur manifestation (« bassin d'aléa » défini et délimité à partir d'un contexte géologique, morphologique et structural où les facteurs d'instabilité, les mécanismes de rupture et de propagation sont similaires).

Les trois niveaux d'activité proposés font référence à une période de retour (100 ans, 10 ans, 1 an), mais sans préciser l'échelle spatiale considérée. Or, une même période de retour sur 50 m ou sur 5000 m de longueur de falaise, traduisent des niveaux d'activité très différents. Il pourrait être judicieux de suivre les recommandations du JTC1 (Tableau 2.1) en considérant la fréquence par linéaire ou surface de zone de départ potentiel.

Il est bien noté qu'un faible nombre d'évènements observés d'une certaine taille ne doit pas empêcher d'estimer la fréquence de rupture, même si l'incertitude est grande (cf. § 5.3).

Dans le guide PPR général (2016), la notion d'aléa de référence est définie clairement dans le cas des inondations comme étant l'évènement de fréquence centennale. A cet évènement, correspond une intensité centennale (hauteur d'eau et éventuellement d'autres paramètres hydrauliques) en tout point du bassin de risque considéré, qui servira au zonage dans le plan de prévention des risques.

L'approche MEZAP est différente puisque cette notion d'intensité « centennale » au niveau des enjeux n'est pas intégrée (un bloc centennal au départ donne au niveau des enjeux potentiels, des évènements qui ne sont plus centennaux, mais beaucoup moins fréquents). S'il fallait tracer des courbes iso-intensité dans le périmètre d'étude d'un PPR, il faudrait considérer tous les évènements historiques et non un évènement de référence. Il en résulte que pour connaître le volume centennal au niveau des enjeux, il faudrait considérer des volumes de fréquence plus forte au départ (donc toute une gamme de volume).

### Probabilité de propagation

La méthode MEZAP n'impose pas les moyens suffisants qui sont laissés à l'appréciation de l'expert sur la base du cahier des charges. La vision experte demeure une clé de la cartographie des aléas, cela implique qu'elle soit clairement argumentée et justifiée. Dans tous les cas, *in-fine*, les emprises des propagations proposées devront être traduites en valeur d'angle de ligne d'énergie par zone de propagation homogène. Le but est de garantir une transparence et une évolution possible de l'expertise sur la base de nouvelles observations ou connaissances qui impliquent forcément de savoir ce qui avait été mis en œuvre précédemment.

L'évaluation de l'emprise globale de propagation n'impose pas de déterminer la distribution des points de passage des blocs dans les versants depuis les zones de départ. A ce titre, il est proposé de valoriser la méthode de la ligne d'énergie pour estimer les emprises de propagation. Dans le cadre du GT MEZAP, en valorisant cette méthode, l'IRSTEA et le BRGM ont développé des outils d'aide à la cartographie et en particulier un modèle statistique des points d'arrêt d'évènements rocheux à partir de corrélations entre la morphologie des versants et les valeurs d'angle de la ligne d'énergie (Figure 3.2, Colas et al., 2018).

Ces outils ne sont pas imposés dans le cadre de la méthode MEZAP. En effet, pour rappel, la méthode vise à dérouler le cheminement des acquisitions / évaluations pour aboutir à une approche structurée de l'aléa. Les moyens sont variés mais les résultats sont considérés comme homogènes et comparables.

L'approche retenue pour la hiérarchisation de la propagation est laissée à l'appréciation du prestataire mais il est proposé qu'elle comprenne *a minima* une évaluation de trajectoires préférentielles, basée sur une approche morphologique : concentration des trajectoires vers les zones de talweg, report des zones d'éboulis – récents ou anciens, etc. Les méthodes basées sur la ligne d'énergie peuvent être là encore privilégiées en raison de leur facilité de mise en œuvre. Ceci étant, la trajectographie en 2D ou en 3D demeure un outil pour la hiérarchisation de l'aléa de propagation, et le couplage des méthodes (ligne d'énergie, trajectographie) est encouragé par MEZAP.

La MEZAP fait également état des conditions de prise en compte d'obstacles à la propagation : forêt (Tableau 6.4), ouvrages de protection ou présence de constructions. Lorsqu'une forêt est présente sur une pente, elle a un impact potentiel sur l'aléa rocheux. Cet impact est d'autant plus important que la distance de propagation en forêt est longue, que le volume se propageant est petit, et que le boisement présente des caractéristiques favorables à l'arrêt des blocs. La localisation, la caractérisation et le traitement des forêts interférant sur les aléas chutes de pierres doivent être précisés dans le zonage de l'aléa chute de pierres. L'attention est portée sur le risque de disparition du couvert forestier (ex. avalanche, incendie ou maladies) et des conséquences engendrées : absence de protection comme obstacle à la propagation, mais également aléa possiblement accru par remobilisation de blocs en versant.

Volume du bloc de l'aléa de référence	Intensité	Taillis	Futaie claire	Futaie dense
$\leq 0,25 \text{ m}^3$	Très légère à légère	X	X	X
$0,25 \text{ m}^3 \leq V < 1 \text{ m}^3$	Modérée	Effet limité	X	X
$1 \text{ m}^3 \leq V < 5 \text{ m}^3$	Elevée	Effet très limité	Effet limité	X
$> 5 \text{ m}^3$	Très élevée	Aucun effet		

Tableau 6.4 : Effet de la forêt sur la probabilité de propagation

### Probabilité d'atteinte

Dans la version 2014, la qualification de la probabilité d'atteinte (appelée probabilité d'occurrence dans la note) est définie à partir du tableau 6.5 en croisant la probabilité de propagation (appelée probabilité d'atteinte) en un point et la probabilité de départ qualifiée par l'indice d'activité. Une évolution a été proposée en 2020 (tableau 6.6), qui prend en compte les recommandations du JTC-1 en matière de relation entre qualification et quantification du risque, risque sous-entendu avéré de dommages aux ouvrages et de risque pour les personnes.

		Probabilité d'atteinte			
		Faible	Moyenne	Forte	Très Forte
Indice d'activité	Faible	Faible	Modérée	Elevée	Très Elevée
	Moyen	Modérée	Modérée	Elevée	Très Elevée
	Fort	Modérée	Elevée	Elevée	Très Elevée

Tableau 6.5 : Définition de la probabilité d'atteinte de l'aléa de référence en un point (MEZAP, 2014)

		Probabilité de propagation					
		Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte	
Activité		$10^{-6}$	$10^{-5}$	$10^{-4}$	$10^{-3}$		
Indice d'activité	Faible (1 / 100 ans)	$10^{-2}$	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	
	Moyen (1 / 10 ans)	$10^{-1}$	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	
	Fort (1 / an)	1	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	

Tableau 6.6 : Définition de la probabilité d'atteinte de l'aléa de référence en un point (MEZAP, 2020)

### Qualification du niveau d'aléa

Dans la version 2014, le niveau d'aléa est qualifié en tout point de la zone d'étude en utilisant le tableau 6.7. L'évolution proposée en 2020 est présentée dans le tableau 6.8.

		Intensité				Phénomène de grande ampleur (écoulement turbulent)
		$V \leq 0,25 \text{ m}^3$	$0,25 < V \leq 1 \text{ m}^3$	$1 < V \leq 10 \text{ m}^3$	$V > 10 \text{ m}^3$	
		Faible	Modérée	Elevée	Très élevée	Cartographie avec un niveau d'aléa unique: très élevé (Cf. 3.1)
Probabilité d'occurrence	Faible	Faible	Modéré	Elevé	Elevé	
	Modérée	Faible	Modéré	Elevé	Elevé	
	Elevée	Modéré	Elevé	Elevé	Très élevé	
	Très élevée	Elevé	Elevé	Très élevé	Très élevé	

Tableau 6.7 : Définition du niveau de l'aléa de référence par zone homogène (MEZAP, 2014)

		Intensité				
		$V \leq 0.05 \text{ m}^3$	$V \leq 0.25 \text{ m}^3$	$0.25 \text{ m}^3 < V \leq 1 \text{ m}^3$	$1 \text{ m}^3 < V \leq 10 \text{ m}^3$	$V > 10 \text{ m}^3$
		Très légère	Légère	Modérée	Elevée	Très élevée
Probabilité d'atteinte	Faible $10^{-5}$	Faible	Faible	Moyen	Fort	Fort
	Moyenne $10^{-4}$	Faible	Faible	Moyen	Fort	Fort
	Elevée $10^{-3}$	Faible	Moyen	Fort	Fort	Très fort
	Très élevée	Moyen	Fort	Fort	Très fort	Très fort

Tableau 6.8 : Définition du niveau de l'aléa de référence par zone homogène. La probabilité d'atteinte est une probabilité annuelle (MEZAP, 2020)

# Chapitre 7 - Caractérisation des aléas localisés

Un aléa est localisé lorsqu'un compartiment susceptible de se détacher de la falaise a été identifié. L'**aléa de départ** est caractérisé essentiellement par un volume et une probabilité de rupture pour un délai donné (la notion de fréquence n'est plus pertinente pour un aléa localisé). En d'autres termes, cela nécessite de déterminer la fonction de distribution de la durée de vie du compartiment. L'**aléa résultant** en un point du versant peut être caractérisé par une simple probabilité d'atteinte pour un délai donné, qui est le produit de la probabilité de rupture par la probabilité de propagation, ou de manière plus complète par une fonction de distribution de l'énergie et de la hauteur de passage (probabilité que le point soit atteint avec une certaine énergie ou une certaine hauteur).

Dans l'état actuel des connaissances, la probabilité de rupture dans un délai donné ne peut pas être déterminée par une méthode géomécanique quantitative. En effet, les méthodes probabilistes permettent de déterminer la fonction de distribution du coefficient de sécurité actuel (avec beaucoup d'incertitude), mais pas son évolution future (Nadim et al., 2005, p. 93). La probabilité de rupture est donc estimée qualitativement, à dire d'expert ou en utilisant un système empirique de notation. Nous présenterons ces deux approches dans les paragraphes suivants.

Nous présenterons ensuite une approche globale intégrant les aléas localisés dans un contexte plus large d'aléa diffus, qui permet d'estimer quantitativement les probabilités de rupture.

## Commentaire

Le cas des compartiments en mouvement faisant l'objet d'une surveillance a été traité dans la cadre de l'action C2ROP P1.4 (voir le guide C2ROP Surveillance instrumentale pour la gestion du risque rocheux : Recommandations).

## 7.1. Estimation de la probabilité de rupture en utilisant un système de notation

Cette approche est peu utilisée en France. Un exemple est donné en Suisse par la méthode Matterock (Baillifard et al., 2001), utilisée dans le domaine pennique valaisan (CH). La probabilité de rupture est qualifiée en utilisant le système de notation présenté dans le Tableau 7.1. Elle est combinée à la probabilité de propagation pour obtenir la probabilité d'atteinte (Tableau 7.2). Un niveau d'aléa (appelé en Suisse degré de danger) peut ensuite être déterminé en combinant la probabilité d'atteinte à l'énergie probable selon le diagramme de la Figure 2.3.

Critère	Facteurs et processus	Echelle de pondération
Continuité	<ul style="list-style-type: none"> <li>agencement structural</li> <li>probabilité de recouplement</li> <li>activité (reflète la continuité)</li> </ul>	0 à 5 (5 = plan continu)
Degré d'activité	<ul style="list-style-type: none"> <li>chutes de blocs</li> <li>état de fragmentation, dislocation</li> <li>déplacement</li> <li>autres</li> </ul>	0 à 5 : latente 5 à 50 : modérée ≥ 50 : forte
Eau	Présence ou absence	0 à 5
Degré de sensibilité aux facteurs dégradants	<ul style="list-style-type: none"> <li>altération</li> <li>météo et climat</li> <li>séismicité de base</li> <li>facteurs géologiques : dissolution, tassement, glissement</li> <li>facteurs anthropogènes</li> </ul>	0 à 10
Degré de sensibilité aux situations déclenchantes	Facteurs dégradants fortement amplifiés	0 à ≥ 50
Degré de sensibilité aux facteurs stabilisants	<ul style="list-style-type: none"> <li>effet de butée</li> <li>perte de masse</li> <li>permafrost</li> <li>facteurs anthropogènes</li> </ul>	0 à ≥ -50 (attention : signe négatif)
Facteur de sécurité ou appréciation subjective	<ul style="list-style-type: none"> <li>structural</li> <li>géomécanique</li> <li>facteurs déclenchants/stabilisants</li> <li>autres</li> </ul>	-20 à 20

Tableau 7.1 : Système de notation pour qualifier la probabilité de rupture (Baillifart et al., 2001).  
Total = 4 à 8 : probabilité faible. Total = 9 à 49 : probabilité moyenne. Total > 49 : probabilité élevée (sur 30 ans)

	Probabilité de rupture		
	élevée	moyenne	faible
Probabilité de propagation	élevée	moyenne	faible
	moyenne	faible	-
	faible	-	-

Tableau 7.2 : Estimation de la probabilité d'atteinte à partir de la probabilité de rupture et de la probabilité de propagation (Baillifard et al., 2001)

## 7.2. Estimation de la probabilité de rupture à dire d'expert

### 7.2.1. Méthode LCPC

Le guide LCPC «Les études spécifiques d'aléa lié aux éboulements rocheux» (LCPC, 2004) présente une méthode pour des études d'aléa ayant finalité à déboucher sur des propositions de parades.

La probabilité de rupture est qualifiée à dire d'expert à partir des différents facteurs de prédisposition internes et externes (Tableaux 7.3, 7.4 et 7.5). Chaque compartiment identifié (aléa localisé) «est qualifié par un ou plusieurs couples probabilité-délai» et son volume est quantifié (p. 49). Cinq délais peuvent être considérés : imminent ; très court terme (2 ans) ; court terme (10 ans) ; moyen terme (30-50 ans) ; long terme (100-150 ans).

Cinq niveaux de probabilité sont définis comme suit, de manière purement qualitative.

- Très élevée : l'occurrence du phénomène est normale ; sa non-occurrence serait exceptionnelle.
- Elevée : l'occurrence du phénomène est plus envisageable que sa non-occurrence.
- Modérée : l'occurrence du phénomène est équivalente à sa non-occurrence.
- Faible : la non-occurrence du phénomène est plus envisageable que son occurrence.
- Très faible : la non-occurrence du phénomène est normale ; son occurrence serait exceptionnelle.

L'estimation pour plusieurs délais dans une même étude, présentée comme une «déclinaison» de la méthode, peut être exploitée «pour apporter la meilleure réponse face au risque : action rapide pour les classes de délais les plus courts et les enjeux les plus forts, programmation d'actions préventives pour les délais les plus longs.» Notons que les délais et les probabilités ne sont pas destinés à être combinés pour aboutir à un niveau d'aléa, ce qui conduirait à «oublier» le délai probable de rupture, utile au MOA pour prioriser les actions. L'estimation sur différents délais ne semble pas généralisée car dans les trois exemples présentés (encadrés 2 et 3, figure 13 et tableau VII du guide), l'estimation est effectuée pour un seul délai propre à chaque compartiment.

La Figure 7.1A représente différents délais avant rupture et de manière schématique, leur densité de probabilité, qui reflète l'incertitude de l'estimation. Les délais considérés vont jusqu'à 1000 ans pour mieux refléter la réalité des phénomènes géologiques.

La Figure 7.1B représente les fonctions de distribution cumulatives associées à chaque délai, c'est-à-dire la probabilité que la rupture survienne avant le délai indiqué en abscisse. Le fait d'estimer la probabilité de rupture pour plusieurs délais revient à construire une de ces courbes (celle qui est centrée sur le délai avant rupture le plus probable). Cependant il est difficile, pour des compartiments actuellement stables examinés individuellement, d'affecter des probabilités différentes à des délais (10 ans et 100 ans par exemple) qui sont proches relativement à l'échelle de la durée de vie des compartiments, qui est de plusieurs siècles ou millénaires (Hantz et Frayssines, 2009).

L'estimation étant souvent effectuée pour un seul délai, le fait que les probabilités ne soient pas définies en termes de probabilité annuelle, comme préconisé par le JTC1, pose problème pour comparer des aléas entre eux (entre différents compartiments, différents sites ou différentes études pour lesquelles le délai considéré n'était pas le même).

La probabilité de propagation peut être déterminée qualitativement à dire d'expert (5 niveaux de très faible à très élevée) ou par une étude trajectographique. Il n'est pas donné de méthode pour combiner les probabilités de rupture et de propagation. Dans les exemples donnés, l'aléa résultant est caractérisé par une intensité (volume ou énergie) qui n'est associée à aucune probabilité.

Processus	Agents	Effets	Circonstances facteurs aggravants	Dynamique
Altération physico-chimique, dissolution (matrice ou (et) discontinuités)	Un peu d'eau. Cycles hydroclimatiques (contexte local). Acides humiques	Altération matricielle, abaissement des caractéristiques intrinsèques ( $\sigma_c$ , $\sigma_t$ ). Destruction des ponts de matière, perte de cohésion. Altération des caractéristiques de cisaillement	Fracturation ouverte. Lapiaz en crête de falaise	Lente et souvent masquée (évolution des ponts de matière)
Dislocation	Évolution gravitaire. Racines, effet mécanique de vérin, balancement, action chimique (pour mémoire). Effet de cliquet. Fluage d'une assise. Dislocation active d'un versant. Gel, faible profondeur	Destruction mécanique des ponts de matière. Ouverture de la fissuration, des imbrications	Lithologie, structure, nature de la végétation	Lente sous nos latitudes
Érosion mécanique, ablation, mise en surplomb, déchaussement	Écoulements d'eau (entraînement des fines et désolidation), abrasion (eau chargée). Érosion éolienne (roches tendres)	Mise en déséquilibre par réduction de l'appui. Perte de cohésion (entraînement des remplissages argileux)	Pluviométrie, action humaine	Variable, peut être rapide
Action mécanique de l'eau (pression hydraulique)	Infiltrations provenant d'écoulements superficiels. Circulations internes du massif. Marnage (littoral). Phénomènes karstiques	Déstabilisation par des poussées hydrauliques	Gel des exutoires naturels ou drains. Tempêtes violentes	Variable, peut être rapide. Phénomène cyclique ou accidentel
Géllfraction	Gel	Réduction des surfaces d'appui par ablation. Décohésion et dislocation des fractures. Éclatement superficiel du matériau	Présence d'eau, contexte climatique favorisant la répétition des cycles gel-dégel	Lente
Fatigue mécanique (cycles lents, cycles journaliers)	Sollicitations physiques cycliques saisonnières. Niveau moyen de contrainte élevé	Écaillage, dégradation des caractéristiques mécaniques ( $\sigma_c$ , $\sigma_t$ ). Aggravation par phénomène de cliquet	Importance des fluctuations thermiques, hydrogéologiques ou hydrauliques	Rarement processus significatif à l'échelle humaine, sauf contextes extrêmes
Application de forces extérieures	Variation d'effort transmis par un ouvrage. Déstabilisation anthropique (sous cavages, anciennes cavités, minages, vibrations, terrassements). Modification des conditions hydrauliques (rejets non contrôlés, drainages défaillants). Séismes	Déstabilisation, activation de nouveaux mécanismes de rupture	Orientation des discontinuités. Défaut d'entretien d'anciens travaux. Vieillessement des systèmes de stabilisation (dispositifs de renforcement)	Variable, éventuellement rapide. Peut être accidentel

Tableau 7.3 : Processus d'évolution des parois rocheuses (LCPC, 2004)

Mécanismes	Processus	Stabilité mécanique	Indices d'évolution	Cinématique
Rupture de surplomb	Décohésion	Statiqument instable*. Contrôlé par la cohésion et la résistance à la traction sur le plan arrière	Peu perceptibles à l'examen visuel	Rapide, absence de signes prémonitoires
Décollement de dalle en toit	Rupture en traction	Statiqument instable*. Contrôlé par la résistance à la traction (plan de décollement et zone d'encastrement). Effet d'arc-boutement latéral éventuel	Parfois, indices de décollement	Rapide, généralement absence de signes prémonitoires
Glissement plan	Perte de cohésion (rupture, dissolution de ponts rocheux, altération des joints) et mobilisation de frottements	Variable, fonction de l'inclinaison du plan et de la géométrie des épontes, contrôlé par la cohésion, le frottement (sur un seul plan) et les pressions interstitielles	Ouvertures de fissures arrières	Progressive avec signes prémonitoires : rejets, fraîcheur des fissures, chutes de petits blocs en lisière des gros volumes, évolution des remplissages, indices d'activité hydraulique anormale, avaries d'ouvrages proches, tous signes pouvant justifier, pour les très gros volumes, la mise en place de dispositifs d'auscultation
Glissement dièdre	Perte de cohésion et mobilisation de frottements	Variable, fonction de l'inclinaison du plan et de la géométrie des épontes, contrôlé par la cohésion, le frottement (sur deux plans sécants) et les pressions interstitielles	Ouvertures de fissures arrière et latérales	Évolution progressive avec indices d'évolution observables. Accélération rapide en fin de processus
Basculement, déversement (colonnes, grandes écaïlles)	Excursion progressive de la projection verticale du centre de gravité à l'extérieur du polygone d'appui	Statiqument stable, contrôlé par la résistance à la compression de la base ou de l'appui, ou par la poussée exercée par les matériaux de remplissage des fractures arrières	Ouverture de fissures arrières et latérales. Fissuration de la base, écaillage côté vide. Déformation d'ensemble	Évolution progressive avec indices d'évolution observables. Accélération rapide en fin de processus
Flambement	Excès de compression dans le plan, entraînant une instabilité mécanique	Stabilité statique limitée par les déformations, contrôlée par l'état des contraintes, les caractéristiques géométriques, structurales et lithologiques	Ventre (bombement et décollements vers le vide). Fissures de cisaillement du banc comprimé	Généralement progressive dans une phase initiale, rapide en phase terminale
Rupture en compression	Écrasement par excès de contrainte	Statiqument stable, contrôlé par la résistance à la compression	Écaillage et fissures verticales d'extension, fissures obliques de cisaillement, gonflement transversal	Évolution progressive, rupture brutale

Tableau 7.4 : Mécanismes de rupture simple (petit nombre de discontinuités en cause) (LCPC, 2004)

Mécanismes	Processus	Stabilité mécanique	Indices d'évolution	Cinématique
Glissement suivant une surface basale induite par du fauchage	Fauchage : cisaillement interbanc + basculement et localisation d'une surface de rupture. Suppose comme préalable structural une famille de discontinuités très affirmée, à pendage rentrant	Variable, selon la pente du versant et de la surface basale. Contrôlé par le degré de désolidarisation le long de la surface de rupture, l'altération des matériaux et les pressions interstitielles	Basculement vers le vide des têtes de couches. Indices morphologiques actifs (fissures, escarpements, bombements)	Variable, glissement lent susceptible d'accélération en période de crise temporaire et en phase terminale. Appréciation du degré d'activité par auscultation pour les gros volumes
Déstabilisation d'un ensemble chaotique de blocs ou de blocs isolés	Perte d'équilibre d'un empilement instable (Fig. 12)	Précaire, contrôlé par l'imbrication des blocs, l'érosion et la stabilité du substratum	Traces de mouvements relatifs des blocs	Variable, reptation lente d'éboulis, éboulement brutal d'accumulation de blocs, remobilisation de blocs isolés
Glissement suivant une surface basale induite par un mécanisme de rupture interne (concerne les très gros volumes)	Aboutissement d'un processus de déformation par rupture interne	Variable selon le degré de localisation* d'une surface enveloppe de rupture basale	Indices morphologiques actifs : sillons d'effondrement, contre-pentes, ouverture de fractures	Lente dans la phase de déformation, peut être rapide (éventuellement brutale) après localisation d'une surface de rupture basale. Le suivi instrumenté de la cinématique de l'ensemble du mouvement est un bon indicateur de l'état d'évolution de l'instabilité

Tableau 7.5 : Mécanismes de rupture composée (LCPC, 2004)

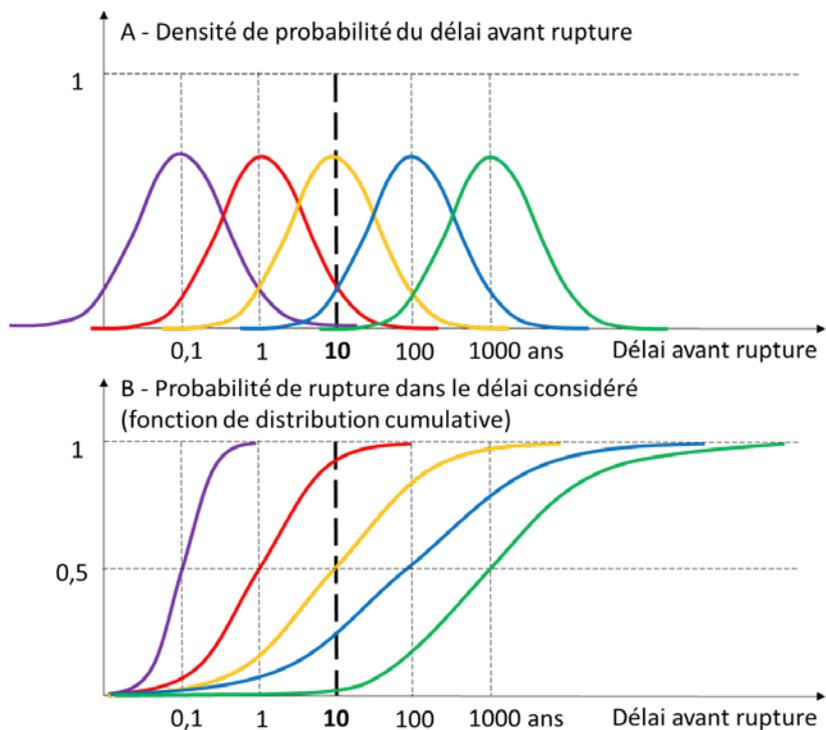


Figure 7.1 : Incertitude sur l'évaluation du délai avant rupture

## 7.2.2. Pratique des bureaux d'études français

### Aléa de départ

En 2014, la thèse d'Adeline Delonca a traité des incertitudes lors de l'évaluation de l'aléa de départ des éboulements rocheux. Dans ce cadre, la probabilité de départ de 3 aléas a été évaluée par 8 experts confirmés, 10 chercheurs en géosciences et 38 élèves-ingénieurs de l'Ecole des Mines de Nancy (bac+4), en utilisant d'une part une méthode s'appuyant sur le guide LCPC, d'autre part une méthode proposée par l'INERIS utilisant le SMR (Slope Mass Rating).

Pour évaluer la probabilité de départ (appelée susceptibilité ou prédisposition à l'instabilité) dans la première méthode, les experts (dont certains étaient rédacteurs du guide LCPC) ont utilisé non pas une matrice, mais une échelle représentée dans le tableau 7.6, préférant ainsi n'estimer qu'un seul paramètre. Ce paramètre est soit le délai probable avant chute, soit la probabilité de rupture dans un délai donné non précisé mais qui semble être de 10 ans (car la probabilité 0.5 correspond au délai de 10 ans). Nous ne rapportons ici que cet aspect du travail présenté par A. Delonca, car il est difficile d'interpréter les résultats du benchmark. En effet, le volume rocheux dont la probabilité de rupture devait être estimée (scénario) n'était pas fixé au départ, mais choisi par chaque participant.

<b>Très élevée (te)</b>	La rupture du ou des bloc(s) va avoir lieu, et ce de manière imminente
<b>Elevée (e)</b>	La rupture du ou des bloc(s) est plus envisageable que sa stabilité ; le délai probable avant chute est de 2 ans environ
<b>Moderée (m)</b>	La probabilité de rupture du ou des bloc(s) est équivalente à celle de sa stabilité ; le délai probable avant chute est de 10 ans environ
<b>Faible (f)</b>	La stabilité du ou des bloc(s) est plus envisageable que sa rupture ; le délai probable avant chute est de l'ordre de 30-50 ans
<b>Très faible (tf)</b>	La stabilité du ou des bloc(s) est normale Une rupture serait exceptionnelle ; le délai probable avant chute est de l'ordre de 100-150 ans

Tableau 7.6 : Echelle utilisée par les experts pour estimer la probabilité de rupture dans le cadre de la thèse d'A. Delonca (2014)

Le besoin de n'estimer qu'un seul paramètre a également été exprimé dans le groupe de travail C2ROP A4.1 ; soit le délai avant rupture, soit la probabilité pour un délai fixé par le MOA (période de référence). Sur la Figure 7.1, cela revient à choisir soit un point sur la ligne horizontale de probabilité 0,5, soit un point sur une ligne verticale correspondant à la période de référence intéressant le maître d'ouvrage. Mais dans sa démarche, le géologue se pose nécessairement la question du délai le plus probable. Une fois ce délai estimé (qui correspond à une probabilité moyenne sur la Figure 7.1B) et quelle que soit la forme de la fonction de distribution (donc l'incertitude), il en découle nécessairement que la probabilité sera plus faible pour un délai plus court, et plus forte pour un délai plus long. On peut aussi imaginer que l'estimation consiste à tracer une courbe sur la Figure 7.1, courbe dont la forme dépendra de l'incertitude sur le délai avant rupture. De cette courbe, on pourrait théoriquement déduire la probabilité de rupture pour n'importe quel délai souhaité par le MOA. Dans tous les cas, si une analyse du risque est envisagée, il sera utile d'évaluer une probabilité de rupture annuelle.

Pour des raisons pratiques, le MOA peut être intéressé par une estimation pour différents délais, mais il est difficile pour un expert de différencier des délais trop proches à l'échelle des phénomènes géologiques. C'est pourquoi nous avons considéré un facteur minimal de 10 entre les délais considérés sur la Figure 7.1.

Le Pôle risques naturels du Département de l'Isère a comparé en 2017, 9 méthodes de caractérisation des aléas localisés, appliquées par des bureaux d'études.

Il est constaté une certaine hétérogénéité concernant les classes de volume des compartiments, qui semble due en partie au fait qu'il n'est pas précisé s'il s'agit des compartiments potentiellement instables dans leur totalité ou des éléments qui le composent initialement ou encore des éléments qui se propagent après les premiers impacts.

7 bureaux d'étude sur 9 utilisent une matrice probabilité/délai comme préconisé par le LCPC (2004), avec des significations différentes pour les termes employés servant à qualifier le délai (d'imminent à long terme). Mais il n'est pas précisé s'il s'agit : a) de la probabilité que la chute se produise **dans** l'intervalle considéré (densité de probabilité de la durée de vie) ; ou b) qu'elle se produise **avant** le délai moyen de l'intervalle (fonction de répartition ou de distribution). D'autre part, la signification des termes pour qualifier la probabilité n'est pas donnée.

Ces bureaux d'étude ont éprouvé le besoin de ne donner finalement qu'un paramètre pour caractériser le «niveau d'aléa de départ», correspondant à la couleur indiquée dans Tableau 7.7. Sur ce tableau, nous avons ajouté un exemple dans lequel la durée de vie (délai) est estimée à 50 ans avec plus ou moins d'incertitude.



Probabilité	BE1			BE2	BE3		BE4
0 - 1%	TF	F	M	TF	F	M	TF
1-10%	E			TF	E		TF
10 -20%	E			TF	E		TF
20-30%	E			TF	E		F
30-40%	E			F	E		F
40-50%	E			F	E		M
50-60%	E			M	TE		M
60-70%	E			M	TE		E
70-80%	E			E	TE		E
80 - 90%	TE			E	TE		TE
> 90%	TE			TE	TE		TE

Tableau 7.9 : Comparaison des grilles de qualification de la probabilité de propagation (TF : très faible ; F : faible ; M : moyenne ; E : élevée ; TE : très élevée)

Le Tableau 7.10 présente une comparaison des grilles utilisées pour déterminer la probabilité d’atteinte.

Le CD38 constate «dans tous les cas un sur-classement de l'aléa de départ par la propagation, sur-classement qui peut avoir des conséquences financières lourdes pour le MOA». Ce sur-classement n’est pas logique, car la probabilité de propagation ne peut que «diminuer» la probabilité de départ pour donner la probabilité d’atteinte. Avec une probabilité de propagation de 1 (100 %), la probabilité de départ n’est pas modifiée (p. 59 du guide LCPC). Cela signifie par exemple, que la combinaison d’une probabilité de propagation très élevée (proche de 1) combinée à une probabilité de départ très faible donne une probabilité d’atteinte très faible. Or on constate à la lecture du tableau, qu’un événement présentant un aléa de départ moyen et une propagation élevée est classé en aléa résultant élevé par 3 BE et en aléa moyen par 1 BE. Le classement en aléa élevé semble aberrant, à moins que le sens donné au qualificatif élevé soit différent lorsqu’il est appliqué à l'aléa de départ ou à l'aléa résultant.

cas 1						cas 2							
Aléa résultant		Propagation					Aléa résultant		Propagation				
		Très élevé	Elevé	Moyen	Faible	Très faible			Très élevé	Elevé	Moyen	Faible	Très faible
Aléa de départ	Très élevé	Très élevé	Elevé	Moyen	Faible	Très faible	Très élevé	Elevé	Moyen	Faible	Très faible		
	Elevé	Très élevé	Elevé	Moyen	Faible	Très faible	Très élevé	Elevé	Moyen	Faible	Très faible		
	Moyen	Très élevé	Elevé	Moyen	Faible	Très faible	Très élevé	Elevé	Moyen	Faible	Très faible		
	Faible	Très élevé	Elevé	Moyen	Faible	Très faible	Très élevé	Elevé	Moyen	Faible	Très faible		
	Très faible	Très élevé	Elevé	Moyen	Faible	Très faible	Très élevé	Elevé	Moyen	Faible	Très faible		
cas 3						cas 4							
Aléa résultant		Propagation					Aléa résultant		Propagation				
		Très élevé	Elevé	Moyen	Faible	Très faible			Très élevé	Elevé	Moyen	Faible	Très faible
Aléa de départ	Très élevé	Très élevé	Elevé	Moyen	Faible	Très faible	Très élevé	Elevé	Moyen	Faible	Très faible		
	Elevé	Très élevé	Elevé	Moyen	Faible	Très faible	Très élevé	Elevé	Moyen	Faible	Très faible		
	Moyen	Très élevé	Elevé	Moyen	Faible	Très faible	Très élevé	Elevé	Moyen	Faible	Très faible		
	Faible	Très élevé	Elevé	Moyen	Faible	Très faible	Très élevé	Elevé	Moyen	Faible	Très faible		
	Très faible	Très élevé	Elevé	Moyen	Faible	Très faible	Très élevé	Elevé	Moyen	Faible	Très faible		

Tableau 7.10 : Comparaison des grilles de qualification de la probabilité d’atteinte

Pour éviter cette hétérogénéité, il serait préférable de quantifier (même approximativement) les probabilités de départ et de propagation comme suggéré dans le Tableau 7.11. Cela permettrait de combiner les deux de manière rationnelle en les multipliant (voir paragraphe 5.1). Les valeurs indiquées en tête de ligne ou de colonne peuvent être considérées comme des intervalles entre puissances de 10 : par exemple  $3 \cdot 10^{-3}$  correspond à l'intervalle entre  $10^{-3}$  et  $10^{-2}$ . La qualification consisterait donc à estimer un ordre de grandeur de la probabilité de rupture ou de propagation.

		Probabilité annuelle de rupture				
		TE > 0,3	E 0,03	M 3.10 <sup>-3</sup>	F 3.10 <sup>-4</sup>	TF 3.10 <sup>-5</sup>
Proba de propagation	TE > 0,3	TE >10 <sup>-1</sup>	E 10 <sup>-2</sup>	M 10 <sup>-3</sup>	M 10 <sup>-4</sup>	F 10 <sup>-5</sup>
	E 0,03	E 10 <sup>-2</sup>	M 10 <sup>-3</sup>	M 10 <sup>-4</sup>	F 10 <sup>-5</sup>	TF 10 <sup>-6</sup>
	M 3.10 <sup>-3</sup>	M 10 <sup>-3</sup>	M 10 <sup>-4</sup>	F 10 <sup>-5</sup>	TF 10 <sup>-6</sup>	/ 10 <sup>-7</sup>
	F 3.10 <sup>-4</sup>	M 10 <sup>-4</sup>	F 10 <sup>-5</sup>	TF 10 <sup>-6</sup>	/ 10 <sup>-7</sup>	/ 10 <sup>-8</sup>
	TF 3.10 <sup>-5</sup>	F 10 <sup>-5</sup>	TF 10 <sup>-6</sup>	/ 10 <sup>-7</sup>	/ 10 <sup>-8</sup>	/ 10 <sup>-9</sup>

Tableau 7.11 : Combinaison des probabilités de départ et de propagation et proposition de qualification de la probabilité d'atteinte

### 7.3. Approche quantitative globale

Des auteurs du laboratoire ISTerre ont proposé une approche globale intégrant les aléas localisés dans un contexte plus large d'aléa diffus, qui permet d'estimer quantitativement les probabilités de rupture (Vengeon et al., 2001 ; Hantz et al., 2002 ; Hantz 2010). Nous la présentons ici dans le cas le plus simple, où  $N_c$  compartiments potentiellement instables ont été identifiés dans une zone de falaise homogène, avec des probabilités de rupture du même ordre. L'étude quantitative d'aléa diffus permet d'estimer la fréquence de départ globale dans cette zone, et donc le nombre probable  $N_p$  d'éboulements attendus dans la période de référence étudiée. Si le nombre de compartiments identifiés  $N_c$  est très inférieur au nombre attendu  $N_p$ , on peut penser que l'on n'a peut-être pas détecté toutes les ruptures possibles. Si au contraire,  $N_c$  est plus grand que  $N_p$ , on peut en déduire que chaque compartiment a une probabilité de rupture égale à  $N_p/N_c$ .

Ce principe peut être généralisé au cas où les compartiments potentiellement instables sont répartis en classes correspondant à des probabilités de rupture différentes, qui ne peuvent pas être quantifiées de manière absolue, mais de manière relative (la probabilité élevée par exemple est 10 fois plus forte que la probabilité moyenne). Cette approche peu utilisée est pourtant la seule qui permet une estimation quantitative de la probabilité de départ d'aléas localisés, et donc une analyse quantitative du risque.

## Conclusion

Des recommandations internationales pour le zonage de la susceptibilité, de l'aléa et du risque mouvement de pente pour l'aménagement du territoire ont été publiées en 2008 (Fell et al., 2008). Les auteurs soulignaient le besoin croissant d'une gestion quantitative du risque et les progrès récents qui la rendent maintenant possible.

Dans le domaine des éboulements, des méthodes quantitatives étaient déjà largement utilisées pour l'étude de la propagation, mais l'aléa de départ était rarement quantifié (et conséquemment l'aléa résultant). Depuis une dizaine d'années, des méthodes quantitatives permettant de quantifier l'aléa résultant et le risque ont été développées dans plusieurs pays (Suisse, Italie, Espagne, Canada, France, etc.) pour les études d'aléa diffus, grâce à une meilleure connaissance de la fréquence de départ (développement des inventaires historiques, de méthodes de mesure topographique plus performantes, de modèles d'érosion). En Suisse, cette approche quantitative est appliquée dans des recommandations nationales concernant les mouvements de pentes en général. En France, l'approche préconisée dans le guide PPR mouvements de terrains de 1999 est très qualitative, mais des recommandations spécifiques aux éboulements sont en cours d'élaboration, avec une approche qui sera probablement un peu plus quantitative (MEZAP).

Pour les études d'aléas localisés, l'estimation de la probabilité de chute d'un compartiment rocheux actuellement stable, étudié individuellement, relève toujours du jugement d'expert. Mais une étude quantitative d'aléa diffus à l'échelle du bassin d'aléa permettrait de quantifier des probabilités relatives estimées à dire d'expert.

## Bibliographie

- Agliardi F., Crosta G.B., Frattini P. (2009) Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modelling techniques. *Natural Hazards Earth System Science*, 9 (4), 1059-1073. DOI : 10.5194/nhess-9-1059-2009
- Almeida J.A., Kullberg J.C. (2011) Rockfall hazard and risk analysis for Monte da Lua, Sintra, Portugal. *Nat Hazards* 58:289–310.
- Baillifard F., Jaboyedoff M., Rouiller J.D., Tosoni D. (2001) Matterrock, in: Prévention des mouvements de versants et des instabilités de falaises. Confrontation des méthodes d'étude des éboulements rocheux dans l'arc alpin. Programme Interreg II C - "Falaises" Méditerranée Occidentale et Alpes Latines. Interreg II C, Suisse, p.70-79.
- Baroudi H., Hantz D., Asof M., Pignet J.P. (1992) Bench stability in open pit mines: a methodology for jointed rock masses. *Regional conference on fractured and jointed rock masses, Lake Tahoe, U.S.A.*
- Batista D., Binet C., Rat M., Alfonsi P. (2005) Etude statistique de l'aléa chute de pierres sur la R.N.1 à La Réunion. *Geoline 2005*, Lyon.
- Berger F., Clouet N., Monnet J-M., Lopez J., Mermin E., Tardif P., Bigot C., Jancke O. (2009). Expertise trajectographique en 3 dimensions, de l'aléa chute de pierres et de blocs rocheux, pour l'aide à la réalisation de la révision du PPR de la commune de Veyrier-du-Lac
- Bonilla-Sierra V, Scholtès L, Donzé FV, Elmouttie MK. (2015) Rock slope stability analysis using photogrammetric data and DFN-DEM modelling. *Acta Geotechnica*, 10(4):497e511.
- Canton de Vaud (2014) Cartographie des dangers naturels, Vade-mecum.
- Colas B., Berger F., Toe D. (2018) Run-out of rockfall: towards objective assistance in determining the angles of the energy line method. *RSS2018*, Chambéry, p.101-102.
- Corominas J., van Westen C., Frattini P., Cascini L., Malet J-P, Fotopoulou S., Catani F., Van Den Eeckhaut M., Mavrouli O., Agliardi F., Pitilakis K., Winter M.G., Pastor M., Ferlisi S., Tofani V., Hervas J., Smith J.T. (2014) Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. *Bull Eng Geol Environ* 73:209–263, DOI 10.1007/s10064-013-0538-8.
- Corominas J., Matas G., Ruiz-Carulla R. (2018) Quantitative analysis of risk from fragmental rockfalls. *Landslides* DOI 10.1007/s10346-018-1087-9.
- Corominas J. (1996) The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. *Revue canadienne de géotechnique*, 1996, 33(2): 260-271, <https://doi.org/10.1139/t96-005>
- Cuervo S. (2015) Modélisation des éboulements rocheux par la méthode des éléments discrets: application aux événements réels. Thèse de Doctorat, Université Grenoble Alpes. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01256375>
- D'Almeida C., Guerin A., Jaboyedoff M., Hantz D., Noël F., Derron M-H. (2018) Model and cartography of the Saint-Eynard cliff erosion by rockfalls. *3<sup>e</sup> journée de rencontre sur les dangers naturels*, 15 février 2018, Lausanne.
- DDT73 (>2016) Présentation détaillée des aléas.
- Delonca A. (2014) Les incertitudes lors de l'évaluation de l'aléa de départ des éboulements rocheux. Thèse de Doctorat de l'Université de Lorraine.
- Dussaige-Peisser C, Helmstetter A, Grasso J-R, Hantz D, Jeannin M, Giraud A. (2002) Probabilistic approach to rock fall hazard assessment: potential of historical data analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2: 15-26.
- Farvacque M., Lopez-Saez J., Corona C., Toe D., Bourrier F., Eckert N. (2019) How is rockfall risk impacted by land-use and land-cover changes? Insights from the French Alps. *Global and Planetary Change* 174, 138-152, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.01.009>
- Farvacque M., Lopez-Saez J., Corona C., Toe D., Bourrier F., Eckert N. (2019) Quantitative risk assessment in a rockfall-prone area: the case study of the Crolles municipality (Massif de la Chartreuse, French Alps). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 25,1, <http://journals.openedition.org/geomorphologie/12778>
- Farvacque M., Eckert N., Bourrier F., Corona C., Lopez-Saez J., Toe D. (2020) Évaluation quantitative du risque rocheux: de la formalisation à l'application sur les linéaires et les zones urbanisées. Soumis à la Revue française de géotechnique.
- Fell R., HoK.K.S., Lacasse S., Leroi E. (2005) A framework for landslide risk assessment and management. In: Hungr, O., Fell, R., Couture, R., Eberhardt, E. (Eds.), *Landslide Risk Management*. Taylor and Francis, London, pp. 3–26.

- Fell R., Corominas J., Bonnard C., Cascini L., Leroi E., Savage W.Z., on behalf of the **JTC-1** Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes (2008) Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology* 102 (2008) 85-98.
- Ferrari, F., Giacomini, A., Thoeni, K. (2016) Qualitative rockfall hazard assessment: a comprehensive review of current practices. *Rock Mech. Rock. Eng.* 49, 2865-2922. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-0918-z>.
- Gasc M., Hantz D. (2019) Mécanique des roches appliquée au génie civil. Dunod, 195 p.
- Goodman R.E. (1989) Introduction to rock mechanics, John Wiley & Sons.
- Hantz D., Dussauge-Peisser C., Jeannin M., Vengeon J-M. (2002) Danger d'éboulements rocheux : de l'opinion d'expert à une évaluation quantitative. *Symp. Geomorphology: from expert opinion to modelling*, Strasbourg, 26-27/04/02, p.115-122.
- Hantz D., Frayssines M. (2009) Rock wall retreat and historical back analysis of failures in Alpine limestone cliffs. In: *Landslide processes: From geomorphologic mapping to dynamic modelling*, Strasbourg, 6-7 February 2009, 125-129.
- Hantz D. (2010) Evaluation de l'aléa de déclenchement des chutes de blocs. In: *Géomécanique des instabilités rocheuses*, Lavoisier, ISBN : 978-2-7462-2990-7.
- Hantz D., Rossetti J-P., Ventrux Q., Berger F. (2016) Aléa rocheux diffus : évaluation quantitative de la fréquence d'impact sur les enjeux. *Journées Nationales de Géotechnique et Géologie de l'ingénieur*, Nancy, 1320-1325
- Hantz D., Ventrux Q., Rossetti J-P., Berger F. (2016) A new approach of diffuse rockfall hazard. In: *Landslides and Engineered Slopes - Aversa et al. (Eds)*. Associazione Geotecnica Italiana, Rome, Italy, ISBN 978-1-138-02988-0, 1063-1067.
- Hantz D., Rossetti J-P., Valette D., Bourrier F. (2017) Quantitative rockfall hazard assessment at the Mont Saint-Eynard (French Alps). *6th Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection*, May 22-24, 2017, Barcelona, Spain, 4 p.
- Hantz D. (2019) Rapport C2ROP action A1.1.
- Hoek, E. and Bray, J. (1981) Rock Slope Engineering, 3rd edn, Inst. Mining and Metallurgy, London, UK.
- Hungr O., Evans S. G., and Hazzard J. (1999) Magnitude and frequency of rock falls and rockslides along the main transportation corridors of southwestern British Columbia, *Canadian Geotechnical Journal*, 36, 224-238.
- Interreg II C (2001) Prévention des mouvements de versants et des instabilités de falaises. Confrontation des méthodes d'étude des éboulements rocheux dans l'arc alpin. Programme Interreg II C - "Falaises" Méditerranée occidentale et Alpes latines.
- Jaboyedoff M., Baillifard F., Marro C., Philipossian F., Rouiller J.-D. (1999) Detection of rock instabilities: matterock methodology, in: *Joint Japan-Swiss seminar on impact load by rock falls and design of protection structures*, Kanazawa, Japan, 4-7 October 1999, edited by Masuya, H. and Labiouse, V., 13-19.
- Jaboyedoff M., Labiouse V. (2003) Preliminary assessment of rockfall hazard based on GIS data. *ISRM 2003-Technology roadmap for rock mechanics*, South African Institute of Mining and Metallurgy.
- Jaboyedoff M., Baillifard F., Philipossian F., Rouiller J.D. (2004) Assessing the fracture occurrence using the "Weighted fracturing density": a step towards estimating rock instability hazard. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 2004 (4), 83-93. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-4-83-2004>.
- Jaboyedoff M., Dudt J.P., Labiouse V. (2005) An attempt to refine rockfall hazard zoning based on the kinetic energy, frequency and fragmentation degree. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5, 621-632.
- Jaboyedoff M., Metzger R., Oppikofer T., Couture R., Derron M-H., Locat J., Turmel D. (2007) New insight techniques to analyze rock-slope relief using DEM and 3D-imaging cloud points: COLTOP-3D software. In: *Rock mechanics: Meeting Society's Challenges and demands (Vol. 1)*. Eberhardt E., Stead D. and Morrison T. (Eds.), Taylor & Francis, 61-68.
- Jaboyedoff M., Labiouse V. (2011) Technical Note: Preliminary estimation of rockfall runout zones. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 819-828.
- Labiouse V., Abbruzzese J. (2011) Rockfall hazard zoning for land use planning. Lambert S. & Nicot F. *Rockfall Engineering, chapter 7, ISTE*.
- LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) (2004) *Les études spécifiques d'aléa lié aux éboulements rocheux*.
- Leroi E., Bonnard C., Fell R., McInnes R. (2005) Risk assessment and management. In: *Landslide Risk Management*. Hungr, Fell, Couture & Eberhardt (eds).
- Loye A., Jaboyedoff M., Pedrazzini A. (2009) Identification of potential rockfall source areas at a regional scale using a DEM-based geomorphometric analysis. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1643-1653.

- MATE/METL (1999) Guide méthodologique PPR, Risques de mouvements de terrain. La Documentation Française.
- Matasci B., Jaboyedoff M., Loye A., Pedrazzini A., Derron M.-H., Pedrozzi G. (2015) Impacts of fracturing patterns on the rockfall susceptibility and erosion rate of stratified limestone. *Geomorphology* 241, 83–97.
- Mavrouli O.C., Abbruzzese J., Corominas J., Labiouse V. (2014) Review and Advances in Methodologies for Rockfall Hazard and Risk Assessment. In: Van Asch T., Corominas J., Greiving S., Malet J.P., Sterlacchini S. (eds) *Mountain Risks: From Prediction to Management and Governance. Advances in Natural and Technological Hazards Research*, vol 34. Springer, Dordrecht
- MEDE (2015) Guide pratique versants rocheux : phénomènes, aléas, risques et méthodes de gestion.
- MEDE/MEZAP (2013) Méthodologie de l'élaboration du volet « chute de blocs » d'un PPRn.
- MEEM/MLHD (2016) Plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPRN), guide général.
- Merrien-Soukatchoff V., Korini T., Thoraval A. (2012) Use of an Integrated Discrete Fracture Network Code for Stochastic Stability Analyses of Fractured Rock Masses. *Rock Mech Rock Eng* (2012) 45:159–181
- Michoud C., Derron M.-H., Horton P., Jaboyedoff M., Baillifard F.J., Loye A., Nicolet P., Pedrazzini A., Queyrel A. (2012) Rockfall hazard and risk assessments along roads at a regional scale: example in Swiss Alps. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 615–629.
- Moos C., Fehlmann M., Trappmann D., Stoffel M., Dorren L. (2017). Integrating the mitigating effect of forests into quantitative rockfall risk analysis – two case studies in Switzerland. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 32, 55–74.
- Nadim F., Einstein H., Roberds W. (2005) Probabilistic stability analysis for individual slopes in soil and rock. In: Hungri, O., Fell, R., Couture, R., Eberhardt, E. (Eds.), *Landslide Risk Management*. Taylor and Francis, London, pp. 63–98.
- OFAT/OFEV/OFEFP (1997) Prise en compte des dangers dus aux mouvements de terrain dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire, édité par OFAT/OFEV/OFEFP (1997), Berne. <http://www.planat.ch/ressources/planat-product-fr-1032.pdf>
- OFEV (2015) EconoMe – Efficacité et caractère économique des mesures de protection contre les dangers naturels. Recueil de formules. Confédération suisse. 70 pages.
- OFEV (2016) Protection contre les dangers dus aux mouvements de terrain. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/dangers-naturels/publications-etudes/publications/protection-contre-les-dangers-dus-aux-mouvements-de-terrain.html>
- PLANAT (2009) Guide du concept de risque. Plate-forme nationale «Dangers naturels» PLANAT, Office fédéral de l'environnement OFEV, Bründl, M. (Ed.) <http://www.planat.ch/fr/commercialisation-de-materiaux-de-details/datum/2011/07/07/planat-projekt-a11-risikokzept-naturgefahren/>
- Rat M. (2006). Optimisation de la gestion de la route du littoral à la Réunion vis-à-vis du risque de chutes de blocs, Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, 263–264, 43–52.
- Romana, M., Serón, J.B., Montalar, E. (2003). SMR Geomechanics classification: Application, experience and validation. *ISRM 2003–Technology roadmap for rock mechanics*, South African Institute of Mining and Metallurgy, 2003.
- Rouiller J. D., Jaboyedoff M., Marro C., Philipposian F., and Mamin M. (1998) Pentes instables dans le Pennique valaisan. Matterock: une méthodologie d'auscultation des falaises et de détection des éboulements majeurs potentiels, Rapport final du PNR31, VDF Hochschulverlag AG, ETH Zürich, Switzerland.
- Ruiz-Carulla R., Corominas J., Mavrouli O. (2016) Comparison of block size distribution in rockfalls. *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice* – Aversa et al. (Eds) © 2016 Associazione Geotecnica Italiana, Rome, Italy, ISBN 978-1-138-02988-0.
- Scholtès L., Donzé F.V. (2012) Modelling progressive failure in fractured rock masses using a 3D discrete element method. *Int. J. of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 52, 18–30.
- Tanays E., Cojean R., Hantz D., Savary R. (1989) Automatisation de la détection des risques de rupture et de l'évaluation de la stabilité des flancs d'une mine à ciel ouvert. *Industrie minière, les techniques*, n°3-89, pp.35-45.
- Terranum (2019) <https://www.terranum.ch/produits/coltop3d/>
- Valentin J., Capron A., Jongmans D., Baillet L., Bottelin P., Donze F., Larose E., Mangeney A. (2017). The dynamic response of prone-to-fall columns to ambient vibrations: comparison between measurements and numerical modelling. *Geophysical Journal International*, 208(2), 1058–1076.
- van Veen M., Hutchinson D.J., Bonneau D.A., Sala Z., Ondercin M., Lato M. (2018) Combining temporal 3-D remote sensing data with spatial rockfall simulations for improved understanding of hazardous slopes within rail corridors. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18, 2295–2308.

- *Vengeon J-M, Hantz D, Dussauge C. (2001) Prédicibilité des éboulements rocheux : approche probabiliste par combinaison d'études historiques et géomécaniques. Revue Française de Géotechnique, n°95/96, pp.143-154.*
- *Wyllie, C. and Mah, W. (2004) Rock Slope Engineering: Civil and Mining. Taylor & Francis Group, London and New York, 431 p.*
- *Wyllie, D.C. (2017) Rock Slope Engineering: Civil Applications, Fifth Edition, CRC Press, 2017, ISBN 9781498786270 - CAT# K30229.*
- *Wyllie D. C. (2015) Rock fall engineering. CRC Press.*

© 2020 - Cerema

Le Cerema, l'expertise publique pour le développement et la cohésion des territoires.

Le Cerema est un établissement public qui apporte un appui scientifique et technique renforcé dans l'élaboration, la mise en oeuvre et l'évaluation des politiques publiques de l'aménagement et du développement durables. Centre de ressources et d'expertise, il a pour vocation de produire et de diffuser des connaissances et savoirs scientifiques et techniques ainsi que des solutions innovantes au coeur des projets territoriaux pour améliorer le cadre de vie des citoyens. Alliant à la fois expertise et transversalité, il met à disposition des méthodologies, outils et retours d'expérience auprès de tous les acteurs des territoires : collectivités territoriales, services de l'État et partenaires scientifiques, associations et particuliers, bureaux d'études et entreprises.

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement du Cerema est illicite (loi du 11 mars 1957). Cette reproduction par quelque procédé que se soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

Coordination et suivi d'édition › Cerema Infrastructures de transport et matériaux, Département de la valorisation technique, Pôle édition multimédia.

Mise en page › Cerema

Illustration couverture › © Magalie FRAYSSINES

**Août 2020**

ISBN : 978-2-37180-470-8

ISSN : 2417-9701

**Gratuit**

**Éditions du Cerema**

Cité des mobilités

25 avenue François Mitterrand

CS 92803

69674 Bron Cedex

Pour commander nos ouvrages › [www.cerema.fr](http://www.cerema.fr)

Pour toute correspondance › Cerema - Bureau de vente - 2 rue Antoine Charial - CS 33927 - 69426 Lyon Cedex 03

ou par mail › [bventes@cerema.fr](mailto:bventes@cerema.fr)

**[www.cerema.fr](http://www.cerema.fr) › Nos publications**



## La collection « Connaissances » du Cerema

Cette collection présente l'état des connaissances à un moment donné et délivre de l'information sur un sujet, sans pour autant prétendre à l'exhaustivité. Elle offre une mise à jour des savoirs et pratiques professionnelles incluant de nouvelles approches techniques ou méthodologiques. Elle s'adresse à des professionnels souhaitant maintenir et approfondir leurs connaissances sur des domaines techniques en évolution constante. Les éléments présentés peuvent être considérés comme des préconisations, sans avoir le statut de références validées.

## Caractérisation de l'aléa éboulement rocheux

### Etat de l'art

Ce document présente différentes méthodes pouvant être utilisées pour caractériser l'aléa éboulement en termes d'intensité (énergie ou volume) et de fréquence (fréquence temporelle ou probabilité d'occurrence), afin de permettre ensuite une analyse du risque. Les recommandations internationales et quelques recommandations nationales concernant les mouvements de pente en général (*landslides*) sont d'abord évoquées. Puis le cadre théorique permettant de caractériser l'aléa rocheux et le risque associé est exposé en définissant quantitativement les différentes notions utilisées. Différentes méthodes quantitatives ou qualitatives sont ensuite présentées, pour caractériser d'abord les aléas diffus (approche globale à l'échelle d'un versant rocheux homogène), puis les aléas localisés (approche par compartiment rocheux potentiellement instable).

## Sur le même thème, les autres publications du Projet C2ROP

### Axe Aléas

Glossaire du risque rocheux

Caractérisation de l'aléa éboulement rocheux : Etat de l'art

### Axe Parades

Merlons pare-blocs : Recommandations pour la conception, le suivi de réalisation et la maintenance

Les Ouvrages Défecteurs : Guide technique

Surveillance instrumentale pour la gestion du risque rocheux : Recommandations

### Axe Risque

Prise en compte des risques rocheux par les Maîtres d'Ouvrage gestionnaires d'infrastructures : Recommandations

Cahier des charges type pour l'étude de l'aléa éboulement rocheux et la définition des travaux

Cahier des charges type pour les travaux de protection contre les éboulements rocheux

Mémento des ouvrages de protection contre les éboulements rocheux : Maintenance et Coûts

Aide à la formalisation de retours d'expérience à la suite d'un événement rocheux sur infrastructures de transport : Note méthodologique

Aménagement et cohésion des territoires - Ville et stratégies urbaines - Transition énergétique et climat - Environnement et ressources naturelles - Prévention des risques - Bien-être et réduction des nuisances - Mobilité et transport - Infrastructures de transport - Habitat et bâtiment

Gratuit

ISSN : 2417-9701

ISBN : 978-2-37180-470-8



9 782371 804708

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement - [www.cerema.fr](http://www.cerema.fr)

Infrastructures de transport et matériaux - 110 rue de Paris - 77171 Sourdun - Tél. +33 (0)1 60 52 31 31

Siège social : Cité des mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél. +33 (0)4 72 14 30 30