

EVALUATION DE L'ALEA EBOULEMENT : ETAT DE L'ART

ROCKFALL HAZARD ASSESSMENT: STATE OF THE ART

Didier HANTZ¹, Bastien COLAS², Jean-Pierre ROSSETTI³

¹ ISTERre, Université Grenoble Alpes

² BRGM, Montpellier

³ Alp'Géorisques, Domène

RÉSUMÉ – L'article présente un état de l'art de l'évaluation de l'aléa éboulement, réalisé dans le cadre du projet national C2ROP. Des méthodes quantitatives apparaissent pour caractériser les aléas diffus, alors que pour les aléas localisés, l'approche reste heuristique.

ABSTRACT – The paper presents a state of the art for rockfall hazard assessment, which has been carried out in the framework of the national project C2ROP. Quantitative methods are appearing for characterizing diffuse hazards, whereas the approach remains heuristic for localized hazards.

1. Introduction

En 2008, le JTC1 (comité technique pour les mouvements de pentes, issu des sociétés internationales de mécanique des sols, mécanique des roches et géologie de l'ingénieur) publiait des recommandations pour le zonage de la susceptibilité, de l'aléa et du risque liés aux mouvements de pentes en général (*landslides*), dans le contexte de l'aménagement du territoire (urbanisation, voies de communication, ...). Ces recommandations soulignaient le besoin croissant de quantifier le risque (Fell et al., 2008). Depuis, de nombreuses approches quantitatives ont été proposées dans la littérature scientifique et certaines ont été appliquées dans des recommandations nationales (OFEV, 2015). Un état de l'art semblait donc nécessaire, notamment dans le domaine des éboulements rocheux, pour lequel il existe peu de recommandations spécifiques. Dans cet article, nous nous limiterons à l'évaluation de l'aléa.

Un éboulement rocheux ou chute de roche (*rock fall*) est défini comme le mouvement gravitaire d'un ou plusieurs éléments rocheux par chute libre, rebond ou roulement. Il résulte du détachement d'un compartiment rocheux par glissement, par basculement, ou par un mécanisme de rupture plus complexe. En général, le compartiment rocheux est initialement fragmenté en éléments qui se séparent dès le début du mouvement (désagrégation selon la terminologie définie par Ruiz-Carulla et al., 2016) et qui peuvent ensuite se rompre lors des impacts sur la pente ou entre éléments (rupture). Lorsque les éléments qui chutent simultanément sont peu nombreux, on utilise des modèles de propagation qui négligent l'interaction entre eux et simulent donc la chute d'un seul élément à la fois. Dans le cas contraire (éboulement en masse), il faut utiliser une méthode qui modélise les interactions entre blocs et simule donc la chute du compartiment entier constitué de nombreux éléments. Certaines méthodes permettent de modéliser également la rupture de ces éléments lors des impacts.

L'aléa rocheux est défini comme l'arrivée à un point d'intérêt, d'un élément rocheux (pierre, bloc, ...) issu généralement de la fragmentation d'un compartiment, ou du front continu d'un éboulement en masse. Il peut être qualifié d'aléa résultant car il résulte du détachement d'un compartiment rocheux (aléa de départ) et de sa propagation. Il est

caractérisé essentiellement par le volume, l'énergie et la hauteur du (ou des) élément(s), et par une fréquence temporelle ou une probabilité dans un délai donné, selon que l'évènement est considéré comme répétitif ou unique.

Il existe en effet deux approches pour appréhender l'aléa de départ. La première consiste à caractériser globalement l'activité d'une surface rocheuse de départ relativement homogène (falaise, paroi) en termes de fréquence de chute (ou de rupture) en fonction du volume, afin d'estimer ensuite la fréquence d'atteinte aux différents points d'intérêt (zone d'enjeux). L'aléa de départ est alors qualifié de diffus. La seconde consiste à identifier et caractériser les compartiments potentiellement instables, à estimer leur probabilité de chute dans un délai donné, puis la probabilité qu'ils atteignent les points d'intérêt de la zone d'enjeux. On parle alors d'aléas de départ localisés. Cette approche plus détaillée n'est souvent utilisée que pour les plus gros compartiments, les plus petits étant alors considérés globalement.

Dans la méthodologie de gestion du risque présentée par le JTC1, l'étude d'aléa a pour but d'estimer le risque, pour que le maître d'ouvrage évalue si celui-ci est acceptable. Cette évaluation nécessite que le risque soit quantifié, tant pour le risque économique (analyse coût-bénéfice) que pour le risque humain (critères d'acceptabilité en termes de probabilité annuelle de décès). Cependant il est fréquent que le maître d'ouvrage ait déjà estimé le risque et qu'il souhaite le réduire sans pour autant se fixer une valeur de risque acceptable. Une étude destinée à hiérarchiser les différents aléas (sans les quantifier de manière absolue) afin d'aider le maître d'ouvrage à prioriser les mesures de réduction du risque, peut alors être suffisante.

Nous ne traiterons pas de l'identification des aléas, mais seulement de l'estimation de sa fréquence ou de sa probabilité d'occurrence. Une présentation plus détaillée, ainsi que des exemples et des références, sont donnés dans l'état de l'art réalisé dans le cadre du projet national C2ROP.

2. Cas d'un aléa de départ diffus

2.1. Caractérisation directe de l'aléa résultant à partir d'un inventaire des blocs déposés

Un inventaire exhaustif des volumes des blocs déposés sur la zone d'intérêt (ou traversant un itinéraire) pendant une période connue suffisamment longue, permet de caractériser l'aléa résultant en termes de fréquence d'atteinte. Cet inventaire peut être historique (suivi temporel des chutes et mesure des volumes) ou instantané (relevé et mesure à un instant t de tous les blocs visibles). Dans le premier cas, la durée couverte est parfaitement connue, mais elle est généralement limitée à quelques années ou quelques décennies, ce qui sous-estime la contribution des gros éboulements. Dans le second cas, la durée est plus longue mais mal connue (on peut hésiter entre 100 ans et 1000 ans). De plus, les blocs ne sont pas forcément restés en place. Une autre approche possible est l'étude des impacts des blocs sur les arbres, qui permet de les dater, mais le volume des blocs est mal connu.

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

2.2.1. Base théorique

La modélisation complète d'un éboulement nécessite de connaître la structure initiale du compartiment rocheux, qui est généralement découpé (ou prédécoupé) par des discontinuités. Le compartiment peut se désintégrer dès le premier mouvement en une première génération de blocs, qui pourront ensuite interagir entre eux et se briser lors des

impacts. Des méthodes avancées permettent de simuler l'ensemble de ces phénomènes, mais elles sont peu utilisées pour des raisons économiques, et parce que la structure initiale du massif rocheux est mal connue. Ces méthodes peuvent simuler la chute initiale et la propagation d'un compartiment complet de volume donné. Elles peuvent être utilisées pour simuler les éboulements en masse, dans lesquels les interactions entre blocs ne peuvent pas être négligées. Des modèles d'écoulement peuvent aussi être utilisés. Pour simuler les éboulements de plus petit volume, on utilise le plus souvent des méthodes qui simulent la chute d'un bloc individuel (un seul bloc par simulation). Comme l'illustre la figure 1, selon que l'on modélise la propagation de compartiments entiers ou de blocs individuels, la fréquence de départ à utiliser est la fréquence des éboulements (événements) ou celle des blocs.

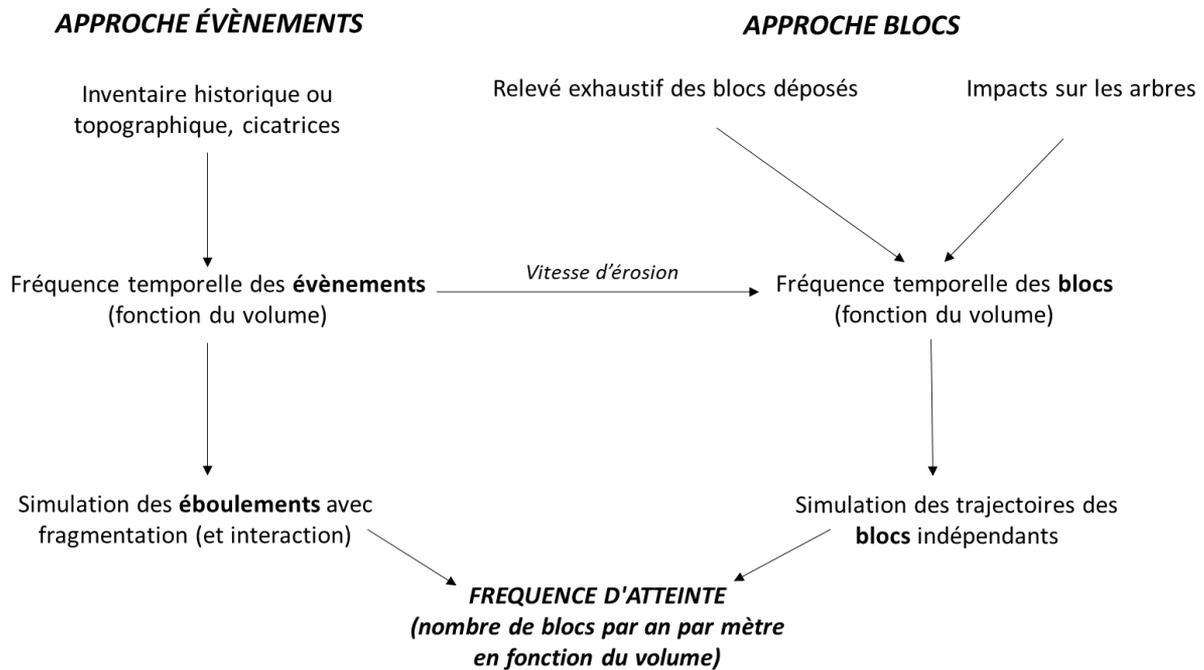


Figure 1. Organigramme fonctionnel pour la caractérisation quantitative de l'aléa diffus.

La méthode la plus réaliste pour prendre en compte la topographie réelle du versant et l'incertitude sur les paramètres qui contrôlent la propagation est la simulation probabiliste 3D des trajectoires. En simulant un nombre N_s de chutes pour chacune des N_c cellules de départ (soit un nombre total de chutes $N_t = N_s N_c$), on simule une durée virtuelle (en conditions constantes) $T = N_t / F_d$, F_d étant la fréquence annuelle des chutes (de compartiments ou de blocs individuels) dans la zone de départ étudiée. La fréquence d'atteinte f_{ae} d'un emplacement (en termes de nombre de blocs par an) est donc :

$$f_{ae} = n/T \quad (1)$$

Où n est le nombre de blocs atteignant l'emplacement considéré. Cette formule est valable que l'on simule la chute de blocs individuels ou de compartiments.

Dans le cas fréquent d'une simulation de blocs individuels, pour une classe de volume V , la fréquence d'atteinte f_{ae} d'un emplacement est :

$$f_{ae}(V) = f_d(V) n/N_t \quad (2)$$

f_d est la fréquence de départ des blocs sur l'ensemble de la zone de départ modélisée, N_t le nombre total de chutes simulées (nombre de cellules sources par nombre de simulations) et n le nombre de blocs atteignant l'emplacement considéré. Le rapport n/N_t est parfois qualifié de probabilité de propagation, mais en 3D il n'est pas une caractéristique intrinsèque de l'emplacement car il dépend du choix (arbitraire) de l'étendue de la zone modélisée. En divisant f_{ae} par la largeur de l'emplacement (ou de la

cellule) considéré(e), on obtient une fréquence d'atteinte spatio-temporelle (nombre de blocs par an et par m de largeur) qui caractérise l'aléa résultant indépendamment de l'enjeu considéré. On peut également obtenir la fréquence d'atteinte pour une énergie minimale donnée.

Par souci d'économie, on ne réalise parfois que des simulations 2D sur quelques profils représentatifs. Si la topographie est cylindrique, en multipliant la fréquence spatio-temporelle de départ (nombre de blocs par an et par m de falaise) par la probabilité de propagation (n/N_t), on obtient la fréquence spatio-temporelle d'atteinte. Mais si la topographie n'est pas cylindrique, la fréquence ainsi obtenue est sous-estimée dans les talwegs et surestimée sur les interfluves. Si le profil correspond à un talweg, il faut considérer la fréquence de départ sur l'ensemble du bassin versant alimentant celui-ci. La fréquence d'atteinte obtenue correspond alors au fond du talweg, où se concentrent les trajectoires (zone délimitée par expertise).

La probabilité de propagation peut également être estimée en utilisant la méthode de la ligne d'énergie (ligne joignant le point de départ au point d'arrivée d'un bloc). Colas et al. (2018) proposent une méthode pour relier l'inclinaison de cette ligne (angle d'énergie) à la probabilité de propagation. Cependant, cette méthode s'appliquant à un profil 2D, il faut tenir compte des talwegs et des interfluves comme pour les simulations trajectographiques 2D. Une autre solution consiste à déterminer les trajectoires extrêmes par une simulation trajectographique 3D déterministe, et à déterminer les probabilités de propagation sur chaque trajectoire par la méthode de l'angle d'énergie.

2.2.2. Estimation de la fréquence de départ des blocs à partir d'un inventaire des blocs déposés et simulation de leur propagation

Cette approche est utilisée lorsque l'on utilise une méthode qui simule la propagation de blocs individuels. Elle consiste à utiliser un inventaire des blocs déposés (cf § 2.1) pour estimer la fréquence de départ des blocs. La fracturation qui se produit pendant la propagation est donc négligée, ce qui peut conduire à une sous-estimation des volumes des blocs en mouvement. Cependant, en admettant que l'essentiel de la fracturation se produit lors des premiers impacts, on peut considérer que la plus grande partie des trajectoires est bien simulée.

2.2.3. Estimation de la fréquence de départ des éboulements et simulation de la propagation

La fréquence de départ des éboulements peut être utilisée directement si la simulation utilisée modélise la chute de compartiments entiers. Si la simulation modélise des blocs individuels, il est nécessaire d'estimer leur fréquence de départ. Celle-ci est estimée en décomposant en blocs individuels le volume total des éboulements, déterminé à partir de leur fréquence (fonction de leur volume). Plus précisément, on estime le taux d'érosion annuel de la falaise en sommant directement les volumes des éboulements observés ou en utilisant une relation fréquence-volume, qui permet de prendre en compte par extrapolation la fréquence de volumes plus gros ou plus petits que ceux observés.

La fréquence de départ des éboulements peut être estimée à partir : (a) de mesures topographiques successives de la falaise (par photogrammétrie ou scan laser) ; (b) d'un inventaire historique comportant au minimum les dates et les volumes des événements ; (c) de l'observation des cicatrices d'éboulements anciens (avec une incertitude sur la durée couverte) ; (d) d'une classification.

La méthode permettant d'estimer la fréquence de départ des blocs est illustrée par la figure 2. Sur la figure 2a, chaque barre horizontale représente un éboulement et sa surface le volume V de celui-ci. La courbe en pointillés représente donc le nombre de chutes de volume supérieur ou égal à V . En le divisant par la durée d'observation et la

surface de la falaise, on obtient la fréquence spatio-temporelle de chute (nombre de chutes par an par m²). Plusieurs études ont montré que cette fréquence pouvait être ajustée par une loi puissance, comme celle indiquée sur la figure 2b, qui est supposée valide jusqu'au volume maximal possible d'un éboulement. Grâce à cette loi, on peut estimer le taux de recul moyen W de la falaise (ou taux d'érosion).

Sur la figure 2c, les blocs résultant de la fragmentation de chaque compartiment de la figure 2a sont représentés avec des couleurs différentes. Différents relevés de terrain ont montré que la distribution cumulée de leur volume v peut également être ajustée par une loi puissance, avec un exposant b qui varie entre 0,6 et 1,3. Cette loi est représentée sur la figure 2d, en termes de fréquence de blocs. Le volume total des blocs étant le même que celui des compartiments, la fréquence des blocs peut être déterminée à partir de l'équation de la figure 2b si l'on connaît W , b et v_{max} (a_{st} est l'inconnue).

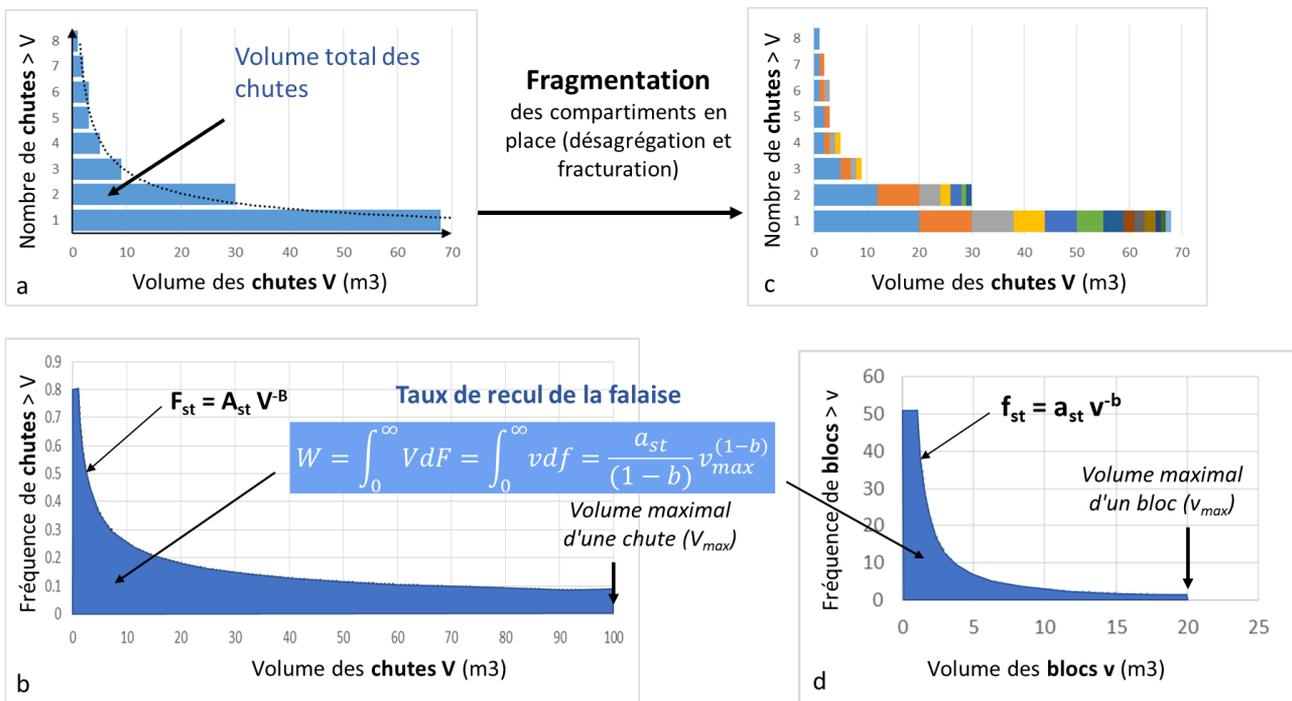


Figure 2. Calcul du taux d'érosion et décomposition en blocs.

En l'absence d'inventaire d'éboulements, Hantz et Levy (2019) proposent une classification qui permet d'estimer les paramètres A_{st} et B de la relation fréquence-volume d'éboulement (figure 3). Ils proposent également une expression simplifiée du volume maximal possible, qui peut aussi être évalué par expertise. Pour le paramètre b de la relation fréquence-volume de bloc, la valeur moyenne de 0,95 peut être utilisée.

2.3. Caractérisation qualitative

2.3.1. Caractérisation par un système de notation

Les méthodes quantitatives décrites jusqu'ici sont fondées sur l'observation du passé pour l'aléa de départ (approche statistique), car les méthodes géomécaniques (approche déductive) ne permettent pas de modéliser l'évolution temporelle d'une falaise. Cependant les facteurs géomécaniques sont pris en compte de manière empirique dans les méthodes utilisant un système de notation, qui fournissent une évaluation qualitative de l'aléa résultant (parfois directement du risque). Elles sont décrites par Ferrari et al. (2016). Les paramètres utilisés pour caractériser l'aléa résultant peuvent être regroupés en 5 catégories : les paramètres relatifs à la fréquence de chute observée ; les

paramètres de prédisposition internes ; les paramètres de prédisposition externes ; les paramètres caractérisant l'intensité de l'aléa résultant (volume des blocs individuels et parfois également celui des événements) ; les paramètres caractérisant la propagation (hauteur, pente, nature, rugosité du versant, végétation, ...). Les différents paramètres sont notés pour aboutir à une note globale qui permet une qualification de l'aléa ou du risque.

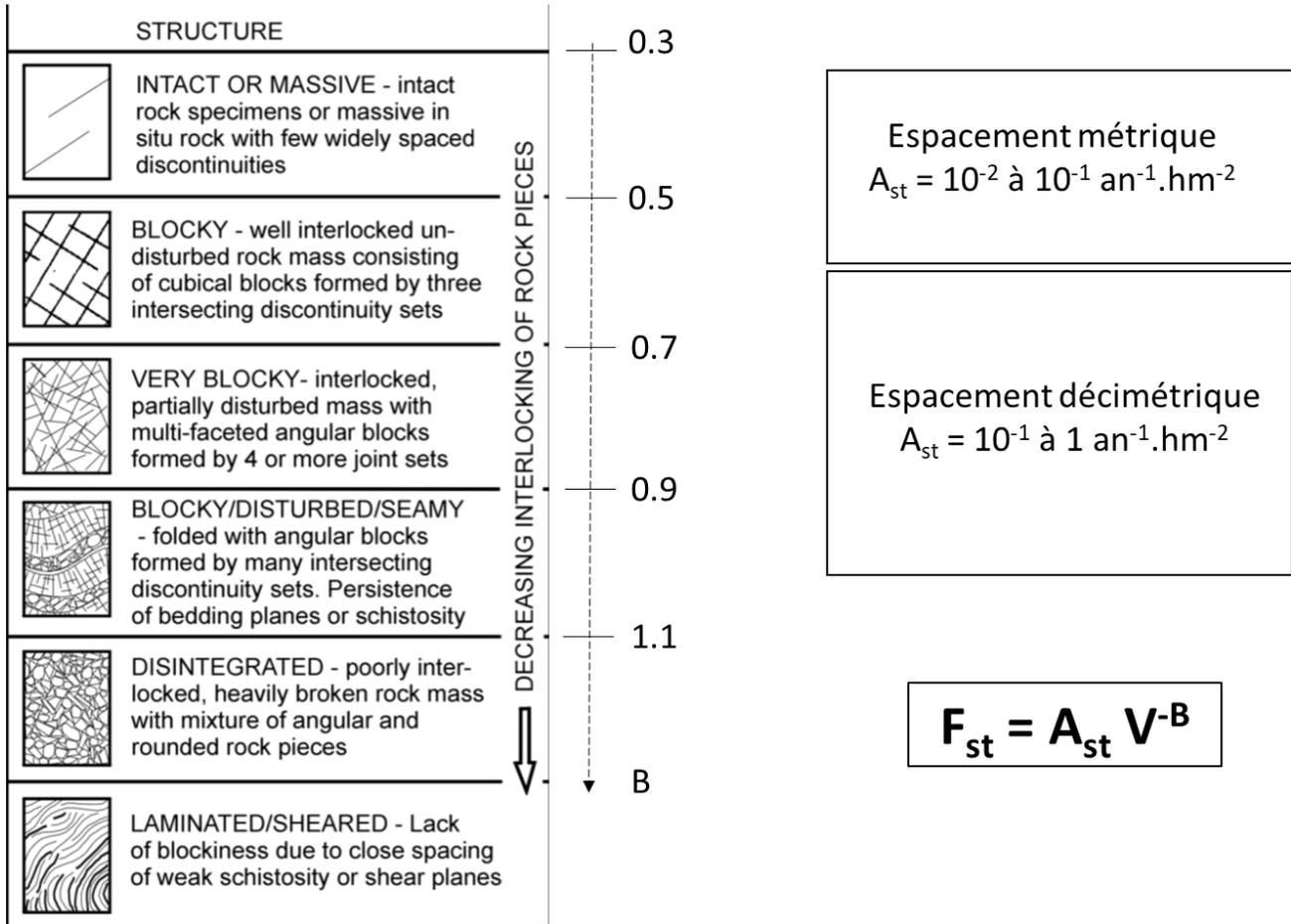


Figure 3. Estimation des paramètres de la relation fréquence-volume (Hantz et Levy, 2019). La figure de gauche est extraite de Hoek (2007).

2.3.2. Caractérisation par expertise

Ces méthodes heuristiques fournissent une qualification de l'aléa par une expertise qui intègre de manière plutôt qualitative les différents facteurs évoqués dans les précédentes méthodes. Des paramètres quantitatifs peuvent être intégrés dans la démarche, mais au final l'aléa n'est pas caractérisé quantitativement.

Les caractérisations qualitatives posent problème car la signification des qualificatifs utilisés (fort, moyen, faible) est très variable d'une méthode à l'autre, et même parfois non définie. Le choix d'un qualificatif est alors très subjectif et peut être influencé par le caractère de l'expert et par la nature des enjeux envisagés. Un même aléa pourrait être qualifié de fort s'il menace une habitation, et de faible, s'il menace une route peu fréquentée. Lorsqu'il conditionne directement un zonage réglementaire (aléa fort = zone inconstructible, par exemple), c'est plutôt le risque qui est qualifié (aléa fort = risque inacceptable). Pour plus d'homogénéité, le JTC1 propose la correspondance donnée dans le tableau 1.

Tableau 1. Terminologie recommandée pour qualifier la fréquence ou la probabilité d'un aléa.

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^{-1}	10^{-2}	10^{-3} - 10^{-4}	10^{-5}	$< 10^{-6}$

3. Cas d'aléas de départ localisés

La probabilité d'atteinte P_a d'un emplacement donné par un éboulement localisé est donnée par :

$$P_a = P_d P_p \quad (3)$$

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.

Si un emplacement est menacé par N aléas localisés indépendants, la probabilité d'atteinte d'un emplacement par au moins une chute, est :

$$P_a = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_{ai}) \quad (4)$$

$P_{ai} = P_{di} P_{pi}$ est la 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.

Comme les modèles géomécaniques ne permettent pas de fournir une estimation de la probabilité de départ dans un délai donné, celle-ci est généralement réalisée par une expertise qui prend en compte les différents facteurs d'influence (cf §2.3.1). (Une étude géomécanique de la stabilité instantanée est parfois réalisée et peut contribuer à l'évaluation.)

La probabilité de départ estimée peut être exprimée quantitativement (nombre entre 0 et 1) ou qualitativement (faible, moyenne, forte, ...), pour être ensuite multipliée ou combinée à une probabilité de propagation, qui peut elle aussi être exprimée quantitativement ou qualitativement. Comme il n'existe pas de règle universelle pour « multiplier » des qualificatifs, de nombreux tableaux combinant les probabilités qualitatives de départ et de propagation ont été proposés. Il apparaît donc nécessaire qu'une signification quantitative (même floue) soit donnée aux qualificatifs utilisés. Une proposition en est donnée dans le tableau 2.

Tableau 2. Proposition de combinaison des probabilités de départ et de propagation.

		Probabilité annuelle de rupture				
		TE > 10^{-1}	E > 10^{-2}	M > 10^{-3}	F > 10^{-4}	TF > 10^{-5}
Proba de propagation	TE > 10^{-1}	TE > 10^{-2}	E > 10^{-3}	M > 10^{-4}	F > 10^{-5}	TF > 10^{-6}
	E > 10^{-2}	E > 10^{-3}	M > 10^{-4}	F > 10^{-5}	TF > 10^{-6}	/ > 10^{-7}
	M > 10^{-3}	M > 10^{-4}	F > 10^{-5}	TF > 10^{-6}	/ > 10^{-7}	/ > 10^{-8}
	F > 10^{-4}	F > 10^{-5}	TF > 10^{-6}	/ > 10^{-7}	/ > 10^{-8}	/ > 10^{-9}
	TF > 10^{-5}	TF > 10^{-6}	F > 10^{-7}	TF > 10^{-8}	/ > 10^{-9}	/ > 10^{-10}

L'estimation de la probabilité de rupture d'un compartiment dans un délai donné, nécessite de se poser la question du délai avant rupture et de sa distribution de probabilité, comme illustré sur la figure 4. En théorie, il faudrait donc déterminer une fonction de distribution du délai avant rupture. Un tableau proposé par le LCPC (2004) permet de construire point par point la fonction de distribution en estimant la probabilité pour 5 délais différents. En pratique, les experts se contentent souvent d'estimer une seule probabilité de rupture (pour un délai fixé par le MOA) ou un délai avant rupture.

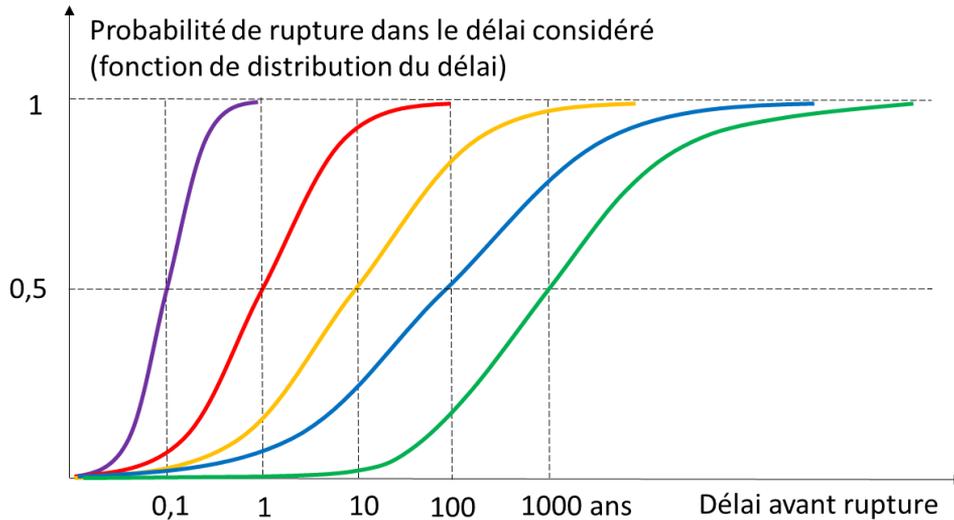


Figure 4. La fonction de distribution du délai avant rupture permet d'estimer la probabilité de rupture pour différents délais (5 délais médians sont représentés).

Le laboratoire ISTerre a 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. Le principe est d'ajuster les probabilités de départ pour qu'elles soient compatibles avec la fréquence de chute globale de la falaise.

4. Références bibliographiques

- 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
- Fell R., Corominas J., Bonnard C., Cascini L., Leroi E., Savage W.Z., on behalf of the JTC-1 (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.
- Hantz D., Levy C. (2019) Quantification de l'aléa diffus. Rapport C2ROP-A1.1.
- Hoek E. (2007) Practical rock engineering, Chapter: Rock mass properties. <https://www.rocscience.com/learning/hoeks-corner/course-notes-books>.
- LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) 2004. Les études spécifiques d'aléa lié aux éboulements rocheux.
- OFEV (2015) EconoMe – Efficacité et caractère économique des mesures de protection contre les dangers naturels. Recueil de formules. Confédération suisse. 70 p.
- Ruiz-Carulla R., Corominas J., Mavrouli O. (2016) Comparison of block size distribution in rockfalls. Landslides and Engineered Slopes. Aversa et al. (Eds).