

Danger d'éboulements rocheux : de l'opinion d'expert à une évaluation quantitative

D. Hantz ¹, C. Dussauge-Peisser ¹, M. Jeannin ¹, J-M. Vengeon ¹

1.LIRIGM, Université Joseph Fourier, Grenoble, France

Résumé : *Une nouvelle méthode, permettant d'estimer la probabilité de rupture de compartiments rocheux potentiellement instables, en fonction du délai, est proposée. Elle est basée, d'une part, sur une approche géomécanique, qui permet de classer les compartiments en fonction de leur probabilité relative de rupture, d'autre part, sur une approche morphodynamique, qui donne, pour différentes classes de volume, le nombre moyen d'éboulements attendus dans le délai considéré. Ce nombre peut être obtenu à partir d'un inventaire d'éboulements ou du taux d'érosion du versant.*

Mots-clé : *Eboulements, Erosion, Risques naturels*

[Abridged English version on last page]

1. Introduction

Le danger d'éboulement rocheux en un point donné résulte de deux processus distincts : le détachement d'une masse rocheuse (rupture locale du versant), et la propagation de cette masse sur la pente. Les questions qui se posent aux responsables de l'aménagement du territoire sont les suivantes : quels compartiments rocheux vont s'ébouler, quand, et jusqu'où vont-ils aller ? Malheureusement, une réponse déterministe à ces questions n'est pas possible, du fait de la complexité de la structure des masses rocheuses et des processus de rupture et de propagation. Seule, une approche de type probabiliste est possible. Pour la propagation des éboulements, des méthodes géomécaniques sont couramment utilisées. Pour leur déclenchement, les méthodes géomécaniques ne permettent pas de prévoir quantitativement, même de manière probabiliste, l'évolution future de compartiments rocheux actuellement stables. En effet, la dynamique des processus d'évolution des versants est très mal connue. C'est pourquoi les évaluations effectuées par les experts sont de nature qualitative et reposent essentiellement sur l'expérience qu'ils ont acquise à travers l'étude de nombreux éboulements survenus dans des conditions variées. Après avoir rappelé les principes utilisés pour ces évaluations qualitatives, nous présentons une nouvelle approche [1] basée, d'une part, sur une évaluation du taux d'éboulement à l'échelle d'un versant entier homogène, d'autre part, sur une hiérarchisation quantitative des compartiments susceptibles de s'ébouler, en fonction de leur probabilité relative d'éboulement. Cette méthode sera présentée à travers l'exemple des falaises calcaires de l'agglomération grenobloise.

2. Détection et évaluation qualitative des zones de départ potentielles

La détection des zones de départ potentielles est basée sur l'identification de configurations géométriques favorables aux éboulements [2] et sur la recherche d'indices de mouvements récents. Elle permet d'identifier des compartiments rocheux susceptibles de s'ébouler (instabilité potentielle localisée), ou des zones homogènes dont la configuration est défavorable, mais dans lesquelles on ne peut distinguer aucun compartiment particulier susceptible de s'ébouler (instabilité potentielle diffuse). Les volumes des compartiments susceptibles de s'ébouler sont estimés à partir du découpage par les discontinuités.

Pour chaque zone de départ potentielle, la probabilité de rupture dans un certain délai est ensuite évaluée de manière qualitative. Le résultat de cette évaluation est une hiérarchisation des zones de départ en quelques classes correspondant à différentes probabilités de rupture. On utilise souvent trois classes correspondant à des probabilités qualifiées de faible, moyenne ou forte. Les facteurs pris en compte dans cette évaluation peuvent être définis à partir d'une analyse géomécanique qualitative du processus conduisant à un éboulement [2]. Ils peuvent être regroupés dans quatre rubriques : activité, stabilité, phénomènes discontinus aléatoires, phénomènes continus ou prévisibles.

Les facteurs d'activité reflètent l'existence de mouvements actuels ou récents. En l'absence de mesures, le principal indice d'activité est l'ouverture récente de fissures. Des chutes de blocs peuvent également être dues à une déformation du versant. En cas de mouvement actuel avéré, le problème ne se pose plus seulement en terme d'aménagement du territoire, mais aussi en terme de sécurité publique. La probabilité de rupture à court terme doit alors être évaluée et des mesures de protection peuvent être préconisées (surveillance, évacuation...). Cette évaluation nécessite des mesures de déplacement, dont l'interprétation sort du cadre de cet article. En l'absence de mouvements, la probabilité de rupture est déterminée par le degré de stabilité actuel (dans les conditions courantes) et l'intensité des phénomènes susceptibles de le réduire.

Le degré de stabilité actuel dépend de la structure géologique du massif et de ses caractéristiques mécaniques et hydrogéologiques. En théorie, il peut être quantifié (par un "coefficient de sécurité") en utilisant des méthodes d'analyse utilisées couramment pour le dimensionnement de pentes futures. Mais en pratique, les incertitudes sur les différents paramètres nécessaires sont tellement grandes, que ces méthodes sont peu utilisées. L'approche sécuritaire utilisée pour le dimensionnement conduirait le plus souvent à des coefficients de sécurité inférieurs à 1 pour des compartiments qui sont pourtant stables.

Parmi les processus susceptibles de réduire le degré de stabilité, on peut distinguer des phénomènes discontinus accidentels, à caractère aléatoire (gros séismes, laves torrentielles, mises en charge hydraulique exceptionnelles...), et des phénomènes continus ou prévisibles (altération, dissolution, fatigue, érosion, déformation lente du versant, interventions humaines...). Outre la sensibilité du compartiment étudié à ces phénomènes, doivent être pris en compte la probabilité d'occurrence des événements aléatoires et la vitesse des processus continus. A l'exception des séismes, pour lesquels une probabilité d'occurrence peut être estimée, ces probabilités et vitesses ne sont pas connues. Il n'existe donc pas de méthodes déductives quantitatives permettant de prévoir l'évolution d'un compartiment actuellement stable.

Le jugement des experts est basé sur l'évaluation des différents facteurs intervenant sur la probabilité de rupture. Dans certaines méthodes [2], chaque facteur est affecté d'un poids, qui traduit son influence sur la probabilité de rupture, et d'une note, qui reflète sa présence ou son intensité sur le site étudié. Les notes affectées à un compartiment permettent alors de calculer un indice, qui est censé refléter sa probabilité de rupture. Bien que ces méthodes présentent un caractère quantitatif, la pondération des différents facteurs reste subjective et sa validation nécessiterait une analyse statistique de données d'éboulements. Il serait alors possible de hiérarchiser les compartiments en fonction de leurs probabilités relatives de rupture (tel compartiment a une probabilité de s'ébouler durant le 21^e siècle 10 fois plus grande que tel autre). Mais les valeurs absolues de ces probabilités ne peuvent être approchées que par la prise en compte quantitative du facteur temps. Dans l'état actuel des

connaissances sur les processus conduisant aux éboulements, cette prise en compte n'est pas possible par une approche géomécanique à l'échelle du compartiment rocheux, mais seulement par une approche morphodynamique à l'échelle du versant.

3. Evaluation des fréquences d'éboulements pour une zone homogène

3.1 Analyse historique

L'analyse historique permet d'estimer le nombre moyen d'éboulements qui se produit dans une zone homogène, pendant une certaine durée et pour une classe de volume donnée. Elle nécessite un inventaire exhaustif des éboulements qui se sont produits dans une zone suffisamment homogène d'un point de vue géologique, morphodynamique et climatique. La période d'observation nécessaire est d'autant plus longue que les volumes concernés sont importants (leur fréquence d'éboulement est alors plus faible).

Nous avons pu effectuer une analyse historique sur les falaises de l'agglomération grenobloise, grâce à un inventaire d'éboulements rocheux réalisé par le service RTM (Restauration des Terrains en Montagne) de l'Isère [3]. Cet inventaire concerne des falaises bordant les massifs de la Chartreuse et du Vercors, dont la longueur cumulée est d'environ 120 km (figure 1). Elles sont constituées de calcaires urgonien, tithonique ou valanginien. Leur hauteur varie de 50 à 400 m. Les bancs ont généralement un pendage inférieur à 30°. Ces falaises sont relativement rectilignes sur plusieurs km, parfois sur près de 20 km, ce qui laisse supposer une vitesse de recul assez uniforme. La zone étudiée est donc relativement homogène du point de vue géologique et morphodynamique. L'inventaire comporte une centaine d'éboulements. Nous l'avons supposé exhaustif sur la période 1935-2000 pour les volumes supérieurs à 100 m³, sur la période 1800-2000 pour les volumes supérieurs à 10⁵ m³, et sur la période 1600-2000 pour les volumes supérieurs à 10⁶ m³. Le nombre d'éboulements observés par classe de volume et la fréquence correspondante (nombre d'éboulements par siècle) sont indiqués dans le tableau 1.

Volume class (m ³)	10 ² -10 ³	10 ³ -10 ⁴	10 ⁴ -10 ⁵	10 ⁵ -10 ⁶	10 ⁶ -10 ⁷
Observation period	1935-2000	1935-2000	1935-2000	1800-2000	1600-2000
Rock fall number	33	9	6	3	2
Frequency (per century)	51	14	9	1.5	0.5

Table 1. Observation period, number of observed rock falls and frequency for each volume class (calcareous cliffs in the Grenoble area).

Le nombre d'éboulements par siècle dans une zone homogène est une variable aléatoire. Certains auteurs admettent que la loi de distribution de cette variable est une loi de Poisson, comme cela est généralement admis pour les séismes. Les fréquences observées doivent alors être considérées comme des estimations du nombre moyen d'éboulements par siècle.

3.2 Loi de distribution des volumes d'éboulement

La fréquence d'éboulement est d'autant plus élevée que les volumes considérés sont petits. La distribution des fréquences en fonction du volume a été étudiée par plusieurs auteurs [3]. Pour les différents inventaires d'éboulements étudiés, la distribution cumulée des fréquences suit une loi puissance à partir d'un certain volume :

$$n(V) = a V^b \quad (1)$$

$n(V)$ étant le nombre d'éboulements par siècle, de volume supérieur à V . Le paramètre b est compris entre 0,4 et 0,7. Le paramètre a représente le nombre d'éboulements de volume supérieur à 1 m^3 , si le domaine de validité de la loi s'étend jusqu'à cette valeur. Il dépend bien sûr de la surface de versant couverte par l'inventaire, mais aussi de l'activité des processus conduisant aux éboulements. Pour comparer différents sites, on peut définir le taux d'éboulement comme étant le nombre d'éboulements par siècle et par hm^2 . Ce taux varie de plusieurs ordres de grandeur, suivant le contexte géologique et morphodynamique de la zone étudiée.

L'ajustement des fréquences cumulées observées dans l'agglomération grenobloise donne les valeurs suivantes : $a = 1122$; $b = 0,55$. Le tableau suivant donne les fréquences observées et calculées à partir de la loi puissance (par classe de volume et cumulées).

Volume class (m^3)	10^2-10^3	10^3-10^4	10^4-10^5	10^5-10^6	10^6-10^7
Observed frequency	51	14	9	1.5	0.5
Observed cumulated frequency	76	25	11	2.0	0.5
Calculated cumulated frequency	91	26	7	2.1	0.6
Calculated frequency	65	18	5	1.5	0.6

Table 2. Observed and calculated frequency and cumulated frequency for each volume class, assuming a power law distribution for the rock fall volumes (calcareous cliffs in the Grenoble area).

Si la loi de distribution traduit une réalité physique, la différence entre les fréquences observées et les fréquences calculées est due au caractère aléatoire du nombre d'éboulements par siècle. Les fréquences calculées constituent alors une meilleure estimation des fréquences moyennes. D'autre part, si la loi de distribution reste valide pour des classes de volumes plus gros ou plus petits que les volumes observés (invariance d'échelle), il est possible d'estimer des fréquences moyennes pour ces classes de volume. A la limite, si la loi était valable jusqu'à des volumes très faibles (il ne s'agit alors plus d'éboulements, mais d'autres processus d'érosion), il serait possible de calculer le volume total érodé par siècle.

3.3 Relation entre fréquence d'éboulement et taux d'érosion

Avec la loi de distribution donnée par l'expression (1), le volume total érodé par siècle, par éboulements de volume compris entre V_1 et V_2 , est donné par l'expression suivante :

$$V_t = \int_{n(V_2)}^{n(V_1)} V dn = \frac{ab}{(1-b)} (V_2^{1-b} - V_1^{1-b}) \quad (2)$$

b étant inférieur à 1, cette intégrale ne converge pas si V_2 tend vers l'infini. Mais comme il existe un volume d'éboulement maximal V_{max} , lié à la taille du versant, la loi de distribution réelle est la suivante :

$$\text{pour } V < V_{\text{max}} \quad n(V) = a V^{-b} ; \text{ pour } V > V_{\text{max}} \quad n(V) = 0 \quad (3)$$

En admettant que cette loi est valide pour toute la gamme des volumes possibles, le volume total érodé par siècle est donné par l'expression :

$$V_t = \int_0^{\infty} Vdn = \frac{a}{(1-b)} V_{max}^{1-b} \quad (4)$$

Si S est la surface totale de versant couverte par l'inventaire, le taux d'érosion est :

$$E = V_t / S \quad (5)$$

Si le paramètre b était indépendant du site, il serait donc possible de calculer le paramètre a à partir du taux d'érosion.

Pour les falaises calcaires de l'agglomération grenobloise, nous avons estimé le volume maximal d'éboulement à 10^7 m³. Le tableau 3 donne les volumes éboulés par siècle pour chaque classe de volume, ainsi que le volume total érodé et le taux d'érosion.

Volume class (m ³)	< 10 ²	10 ² -10 ³	10 ³ -10 ⁴	10 ⁴ -10 ⁵	10 ⁵ -10 ⁶	10 ⁶ -10 ⁷
Fallen volume per century (m ³)	10 893	19 807	55 825	157 336	443 433	2 834 632
Total fallen volume per century	3 521 927 m ³					
Cliff area	24.10 ⁶ m ²					
Erosion rate	0.15 m/century					

Table 3. Fallen volumes per century (calculated from the power law distribution) and erosion rate for calcareous cliffs in the Grenoble area.

3.4 Autres approches du taux d'érosion

En l'absence d'inventaire d'éboulements, le taux d'érosion peut parfois être estimé par d'autres méthodes. L'approche paléogéographique peut fournir une valeur moyenne sur une durée très longue (échelle de temps géologique). Par ailleurs, des mesures ponctuelles, dans l'espace et dans le temps, ont été réalisées sur des marnes. Or le taux de recul des falaises calcaires est, en moyenne, le même que celui des versants marneux sous-jacents. Dans le cas particulier des falaises côtières de craie, le recul est suffisamment rapide pour qu'il puisse être mesuré directement à l'échelle du siècle.

Pour les falaises calcaires de la région grenobloise, nous avons comparé les taux d'érosion obtenus à partir de l'inventaire d'éboulements (à l'échelle du siècle) et à partir d'une étude paléogéographique de la plate-forme urgonienne (échelle de l'ordre de 10⁷ années). D'après Arnaud [4] et Gidon [5], la limite orientale de cette plate-forme à l'époque de sa formation (Barrémien-Aptien) correspondait à peu près à l'accident médian de Belledone (représenté sur la figure 1), et celle-ci se serait retrouvée émergée depuis le début du Miocène supérieur, il y a 10 millions d'années. On peut estimer, d'après la figure 1, que la bordure de la plate-forme a reculé de 10 à 15 km depuis qu'elle est soumise à l'érosion. Il en résulte que la vitesse moyenne de recul des falaises urgoniennes pour cette période, est de 0,10 à 0,15 m par siècle. Compte tenu des incertitudes importantes liées aux deux méthodes, on peut conclure que les taux d'érosion obtenus par les approches historique et paléogéographique sont du même ordre de grandeur.

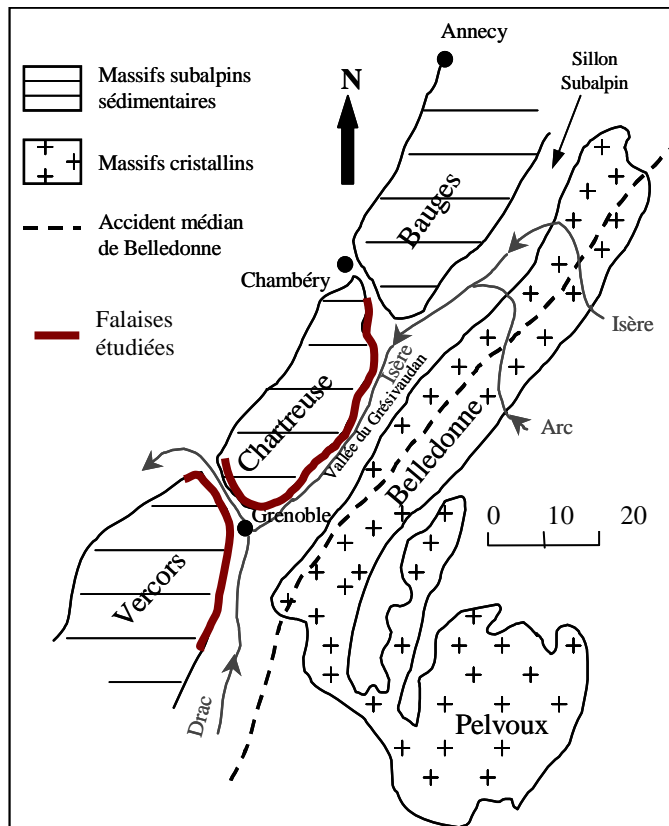


Figure 1. Contexte géologique de l'agglomération grenobloise, d'après Gidon [5]

4. Estimation quantitative de la probabilité d'éboulement dans un délai donné

Les probabilités de rupture individuelles des compartiments rocheux potentiellement instables d'un versant peuvent être estimées en recoupant les résultats fournis, d'une part, par l'approche géomécanique locale décrite au paragraphe 2, et, d'autre part, par l'approche morphodynamique globale décrite au paragraphe 3.

Supposons que, pour une classe de volume donnée, les compartiments aient été classés en trois classes, correspondant à des probabilités de rupture, dans un délai d'un siècle, p_1 , p_2 et p_3 , telles que :

$$p_2 = p_1 / f \text{ et } p_3 = p_1 / f^2 \quad (6)$$

L'espérance mathématique du nombre d'éboulements dans un délai d'un siècle est :

$$n = \sum m_i p_i \quad (7)$$

m_i étant le nombre de compartiments recensés dans la classe i . Cette espérance n est fournie, pour chaque classe de volume, par l'étude morphodynamique. En combinant les équations (6) et (7), on obtient la probabilité inconnue p_1 :

$$p_1 = n f^2 / (m_1 f^2 + m_2 f + m_3) \quad (8)$$

Dans l'agglomération grenobloise, une évaluation du danger d'éboulement est actuellement en cours. Supposons qu'elle conduise à une hiérarchisation des compartiments détectés en deux classes, les compartiments de la seconde classe ayant une probabilité de rupture 10 fois plus faible que ceux de la première ($f = 10$). Supposons également que, dans la classe de volume 10^5 - 10^6 m³ ($n = 1,5$, table 2), il y ait 10 compartiments dans la première classe et 20 dans la seconde. La probabilité de rupture des compartiments de la première classe est alors de 0,125 et celle des compartiments de la seconde classe de 0,0125.

Compte tenu des nombreuses incertitudes qui pèsent nécessairement sur les différents paramètres, ce type de résultat doit être considéré de manière semi-quantitative. Il permettrait cependant de donner un ordre de grandeur des probabilités de rupture associées aux différentes classes de danger qui, actuellement ne sont définies que par des qualificatifs (probabilité faible, moyenne, forte...).

5. Conclusion

Une approche quantitative de la probabilité de rupture des compartiments rocheux potentiellement instables a été proposée. Elle s'appuie, d'une part, sur une analyse géomécanique ayant pour but de classer ces compartiments en fonction de leur probabilité relative d'éboulement, et, d'autre part, sur une étude morphodynamique à l'échelle du versant, qui fournit des fréquences moyennes d'éboulements correspondant à différentes classes de volume. La mise en évidence d'une loi de distribution des volumes d'éboulement permet d'estimer ces fréquences directement, à partir d'un inventaire d'éboulements, ou indirectement, à partir du taux de recul du versant. L'analyse de plusieurs inventaires permettrait d'établir une relation entre les paramètres de cette loi et les caractéristiques géomorphologiques du versant. L'estimation des probabilités relatives de rupture, basée sur l'observation des différents facteurs d'influence, est actuellement trop subjective. Une analyse statistique des ces facteurs, à partir d'une base de données, permettrait une meilleure estimation.

6. Références

- [1] Vengeon, J-M., Hantz, D., Dussauge, C. Prédicibilité des éboulements rocheux : approche probabiliste par combinaison d'études historiques et géomécaniques. *Revue Française de Géotechnique*, 95/96, 143-154 (2001).
- [2] Groupe "Falaises". *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, 2001).
- [3] Dussauge-Peisser, C., Helmstetter, A., Grasso, J-R., Hantz, D., Jeannin, M., Giraud, A. Probabilistic approach to rock fall hazard assessment: potential of historical data analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2, 1-13 (2002).
- [4] Arnaud, H. Paleogeography of the Urgonian limestones of the Southern France. *Géobios, Mémoire spécial*, 3, 363-383 (1979).
- [5] Gidon, M. Vues nouvelles sur la structure des massifs des Bornes et des Bauges orientales. *Géologie alpine*, 72, 35-59 (1996).

Rock fall hazard: from expert opinion to quantitative evaluation

D. Hantz¹, C. Dussauge-Peisser¹, M. Jeannin¹, J-M. Vengeon¹

1.LIRIGM, Université Joseph Fourier, Grenoble, France

Abstract: A new method is proposed to estimate the failure probability of potentially unstable rock volumes, as a function of time [1]. It is based on both geomechanical and morphodynamical approaches: the first one is aimed to classify the rock volumes according to their relative failure probability [2]; the second one to estimate the mean expected rock fall number in the whole slope, for the considered period and for different volume classes. This number can be obtained from a rock fall inventory [3] or from the slope erosion rate. The method is applied to calcareous cliffs in the Grenoble area.

Key-words : Rock fall, Rock avalanche, Erosion, Natural hazards

The detection of potentially unstable rock volumes is based on the identification of failure configurations and on the search for indications of recent or present movements. For each rock volume, the failure probability for a given period is then evaluated qualitatively [1,2]. The considered factors can be divided in four groups: activity (existence of recent or present movements); present stability (can be quantified by a safety factor, but with a large uncertainty); discontinuous uncertain processes (big earthquake, high water pressure, debris flow, for which occurrence probability and sensibility of the rock volume must be evaluated); continuous processes (weathering, progressive damaging, creep and erosion of underlying strata, whose rates are unknown). The evaluation usually results in grading of the rock volumes in qualitative probability classes (high, medium, low failure probability). Statistical analysis of rock fall data is needed to reach a quantitative evaluation of relative failure probabilities.

Mean rock fall frequencies, for a given area and different volume classes, can be estimated from a rock fall inventory (table1) [3]. Assuming a power law distribution for these frequencies (equation 1), better estimates can be obtained (table 2) and a relation can be established between the erosion rate of the whole area and the parameters of the power law (equations 4 and 5, table 3). Assuming the b parameter is site independent, the rock fall frequency could also be obtained without inventory, from the erosion rate of the slope.

Assuming that the potentially unstable volumes of the studied area have been classified in three classes, corresponding to the failure probabilities p_1 , p_2 and p_3 respecting the equations (6), the mean rock fall number per century, for the considered volume class, is given by equation (7), m_i being the number of elements in the class i . As this number n can be obtained from the morphodynamical approach, the unknown probabilities p_1 , p_2 and p_3 can be calculated from equations (8) and (6). Regarding the uncertainties, an order of magnitude of the failure probabilities, as a function of time, can be estimated.