EVALUATION QUANTITATIVE DE L'ALEA D'EBOULEMENT EN PIED DE FALAISE

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF ROCK FALL HAZARD ALONG A CLIFF

Didier HANTZ
LGIT, Université Joseph Fourier, Grenoble.

RÉSUMÉ – Une nouvelle méthode permet d'estimer, à partir d'un inventaire d'éboulements, la probabilité de départ affectant une tranche quelconque d'une falaise homogène, quel que soit le volume de l'éboulement, et la probabilité d'atteinte, avec une énergie minimale donnée, d'un enjeu situé en pied de falaise. La méthode est appliquée à un itinéraire, où le risque humain est également évalué.

ABSTRACT – A new method is presented, which allows to estimate, from a rock fall inventory, the fall probability for a cliff section in a homogenous cliff, considering all possible rock fall volumes. The reach probability for an element located at the foot of the cliff, with a minimal energy, is also estimated. The method has been applied to an itinerary, for which the human risk has been estimated.

1. Introduction et terminologie

Alors que les aléas sismique et inondation peuvent être évalués de manière quantitative à partir de bases de données historiques, l'aléa éboulement rocheux ne peut actuellement être évalué que de manière qualitative, par jugement d'expert (Groupe Falaise, 2001 ; Effendiantz et al., 2004). L'objectif de cet article est de montrer comment, dans certaines situations, l'exploitation d'une base de données permet une évaluation *quantitative* de l'aléa éboulement.

Le terme d'*éboulement* est considéré ici au sens large, comme équivalent du terme anglais "rock fall" (chute de roche), qui désigne les mouvements rocheux dans lesquels un ou plusieurs blocs se détachent de la paroi (chute libre) et éventuellement rebondissent ou roulent sur une pente. Ils font souvent suite au glissement d'une masse rocheuse ou au basculement d'un banc rocheux.

Le terme d'*aléa* ("hazard" en anglais) désigne la probabilité qu'un danger particulier se produise dans un délai donné. Il est parfois utilisé également pour désigner le phénomène lui-même. Dans l'aménagement du territoire, le délai considéré est de l'ordre du siècle. En cartographie de l'aléa, on définit souvent un niveau d'aléa qui prend en compte à la fois la probabilité d'occurrence du phénomène (aléa sensu stricto) et son intensité. Il existe plusieurs définitions de l'intensité, la plus physique étant celle utilisée en Suisse, qui est basée sur l'énergie cinétique.

Dans le cas des éboulements rocheux, le phénomène à considérer dans une étude de risque est le fait qu'un point donné (ou un ensemble de points) soit atteint par une masse rocheuse (constituée d'un ou plusieurs blocs). Cet évènement nécessite d'une part, qu'une masse rocheuse (ou compartiment rocheux) se détache d'une paroi (chute), d'autre part, qu'elle se propage jusqu'au point considéré. Sa probabilité (*probabilité d'atteinte*) est donc le produit des probabilités de ces deux évènements. Nous appellerons *probabilité de rupture* (ou de chute ou encore de départ) la première et *probabilité de propagation* la seconde.

L'estimation de la probabilité de rupture peut concerner une masse rocheuse particulière bien identifiée (localisée en x, y, z), dont les limites sont visibles en surface, ou au contraire une zone de laquelle des blocs peuvent a priori se détacher de n'importe quel point. On parle dans le premier cas, de danger localisé (et d'*aléa localisé*) et dans le second cas, de danger diffus (et d'*aléa diffus*). La méthode présentée dans cet article vise à estimer un aléa diffus sur une zone homogène.

2. La fréquence des éboulements

A une échelle de temps géologique, les éboulements sont des phénomènes répétitifs, qui constituent un des principaux processus d'érosion des reliefs. A l'échelle d'un site particulier et à une échelle de temps humaine, seuls les plus petits d'entre eux sont suffisamment nombreux pour que leur fréquence puisse être déterminée directement par comptage des évènements. En effet, la taille de la fenêtre d'observation spatio-temporelle est insuffisante pour pouvoir appréhender la fréquence de plus gros évènements. Mais dans certains cas, la durée trop courte de la période d'observation peut être compensée par la taille de la zone d'observation, si celle-ci est suffisamment homogène. C'est le cas notamment, pour certaines falaises calcaires, dont la structure et la morphologie varient peu sur des distances de plusieurs kilomètres ou dizaines de kilomètres. Par exemple, les falaises qui dominent l'agglomération grenobloise présentent un tracé relativement rectiligne, qui indique une vitesse de recul uniforme et donc un comportement relativement homogène en termes d'éboulements.

Plusieurs études ont montré que la diminution de la fréquence avec l'augmentation du volume éboulé peut être décrite par une loi puissance (Dussauge-Peisser et al., 2002). Plus précisément, la fréquence F des éboulements de volume supérieur à V (fréquence cumulée) est donnée par la relation :

$$F = \alpha V^{-b} \tag{1}$$

Le paramètre α représente le nombre d'éboulements, par unité de temps, de volume supérieur à 1 m^3. Il dépend de la taille de la zone considérée et des conditions géologiques et géomorphologiques. En revanche, le paramètre b pourrait être indépendant de ces conditions, comme le montrent les différentes analyses d'inventaire réalisées jusqu'à présent, qui couvrent une plage de volume allant de 10^{-4} à 10^7 m^3 (Dussauge-Peisser et al., 2002 ; Dewez, communication orale).

Dans le cas des falaises grenobloises, la fréquence d'éboulement a pu être estimée à partir d'un inventaire historique établi par le service RTM 38, qui comporte des éboulements de volumes compris entre 10^2 et 10^7 m^3, répartis sur une zone de falaise de 200 m de hauteur moyenne et de 120 km de longueur. La période d'observation est de 65 ans pour les volumes inférieurs à 10^5 m^3, et de plusieurs siècles pour les volumes plus importants (Vengeon et al., 2001 ; Hantz et al., 2003). Le paramètre b est estimé à 0,55 ± 0,1 et le paramètre a à 11 éboulements/an, à un facteur 2 près. La relation fréquence-volume d'éboulement permet, par intégration, de calculer le taux de recul de la paroi (Hantz et Frayssines, 2007). La valeur obtenue (1,5 mm/an) est compatible avec le taux de recul de la bordure de la plate-forme urgonienne, estimé à une échelle de temps géologique (de l'ordre de 10 km en 10 millions d'année). Cette relation a également permis d'estimer l'âge moyen de la paroi à 5500 ans, valeur compatible avec les premières datations effectuées sur les falaises grenobloises, qui donnent un âge moyen de 8000 ans (Hantz et Frayssines, 2009).

On peut également définir la ***fréquence spatio-temporelle*** F_{st}, qui représente le nombre d'éboulements par unité de temps (année ou siècle) et par unité de surface de paroi.

$$F_{st} = aV^{-b} \qquad (2)$$

a étant le nombre d'éboulements, par unité de surface et de temps, de volume supérieur à 1 m^3.

3. Fréquence et probabilité de départ dans une falaise homogène

Considérons une falaise homogène de hauteur h. Définissons d'abord une abscisse horizontale x dans la direction des lignes de niveau de la paroi. Supposons dans un premier temps, que les compartiments qui s'éboulent ont tous la même largeur w (mesurée parallèlement à 0x). Pour qu'un profil quelconque de la falaise, d'abscisse x, soit affecté par un éboulement, il faut que le centre de gravité de la masse éboulée se situe à une abscisse comprise entre x-w/2 et x+w/2, c'est-à-dire dans une tranche verticale de falaise d'épaisseur w. La fréquence des chutes affectant un *profil* quelconque de falaise est donc égale à $F_{st}hw$. Suivant le même raisonnement, la fréquence des chutes affectant une *tranche* quelconque de falaise de largeur v est égale à $F_{st}h(w+v)$.

Considérons maintenant que les volumes des compartiments qui s'éboulent sont distribués selon la loi puissance de l'équation (1). La largeur des compartiments n'est plus constante comme nous l'avions supposé au paragraphe précédent. Pour calculer la fréquence des chutes affectant un profil quelconque de falaise, il faut donc considérer une tranche de falaise dont la largeur dépend du volume d'éboulement considéré. La relation entre les volumes d'éboulement et leur largeur, et plus généralement la forme des compartiments, dépend de la structure du massif. Frayssines et Hantz (2006) ont étudié les relations entre la largeur, la longueur et l'épaisseur de compartiments éboulés dans les falaises grenobloises. En moyenne, la longueur (mesurée dans le sens de la pente) est 2 fois plus grande que la largeur, elle-même 4 fois plus grande que l'épaisseur. D'une manière générale, la relation entre le volume v et la largeur w des compartiments peut s'écrire :

$$V = kw^3 \qquad (3)$$

k étant un coefficient de forme (qui vaut 0,5 dans la cas des falaises grenobloises). Lorsque k est inconnu, l'auteur recommande de prendre une valeur égale à 1.

Pour des compartiments de volume compris entre V et (V+dV), la fréquence de chute affectant un profil quelconque peut être calculée comme au paragraphe précédent, mais en exprimant la fréquence et la largeur en fonction du volume (équations 2 et 3) :

$$dF = hwdF_{st} = abhk^{-1/3}V^{-b-\frac{2}{3}}dV \qquad (4)$$

La fréquence de chutes de volume compris entre V_{min} et V_{max} est obtenue par intégration de l'équation (4) :

$$F_r = \frac{3abhk^{-\frac{1}{3}}}{(3b-1)}\left(V_{\min}^{(\frac{1}{3}-b)} - V_{\max}^{(\frac{1}{3}-b)}\right) \qquad (5)$$

Comme b est supérieur à 1/3, cette expression tend vers l'infini lorsque V_{min} tend vers 0, ce qui n'est pas gênant car, en pratique, on ne considère les chutes qu'à partir d'un volume minimal. En revanche, elle a une limite lorsque V_{max} tend vers l'infini, ce qui permet de prendre en compte l'influence des éboulements les plus gros pouvant se produire dans la paroi étudiée. Le volume maximal possible est difficile à estimer, mais la fréquence y est peu sensible car il intervient à une puissance voisine de 0,2. Elle est également peu sensible au paramètre k, qui intervient à la puissance 1/3. En considérant que k peut varier entre 0,4 et 2, $k^{1/3}$ varie entre 0,74 et 1,26. Sachant que la précision recherchée sur l'aléa est de l'ordre d'un facteur 10, le choix d'une valeur de k égale à 1 induit une incertitude largement acceptable.

La fréquence des chutes affectant une tranche quelconque de largeur v, peut être obtenue de la même manière en remplaçant w par (w+v) dans l'équation (3) :

$$F_r = \frac{3abhk^{-\frac{1}{3}}}{(3b-1)}\left(V_{\min}^{\frac{1}{3}-b} - V_{\max}^{\frac{1}{3}-b}\right) + ahv\left(V_{\min}^{-b} - V_{\max}^{-b}\right) \qquad (6)$$

Le problème de la distribution temporelle des mouvements de terrain a été discuté par Durville (2004). Rat (2006) a montré qu'en prenant un pas de temps suffisant (plus de 5 jours), les chutes de bloc sur un itinéraire routier de l'île de La Réunion obéissent à une loi de Poisson. En adoptant cette distribution, la probabilité qu'au moins une chute affecte une tranche quelconque de largeur v durant une période t est :

$$P_r = 1 - e^{-F_r t} = 1 - e^{-\frac{t}{T}} \qquad (7)$$

T étant la période de retour des chutes (inverse de la fréquence). Si la période considérée t est petite devant la période de retour T, la probabilité de départ P_r est voisine de $F_r t = t/T$.

3. Fréquence et probabilité d'atteinte par une chute d'énergie minimale

Considérons maintenant un enjeu de largeur v, situé en pied de falaise, dans une configuration telle qu'il est forcément atteint par une chute affectant la tranche de falaise de largeur v qui le domine (cela suppose que l'objet est suffisamment haut pour ne pas être survolé par les blocs). La probabilité de propagation est alors de 1 et la probabilité d'atteinte égale à la probabilité de départ, donnée par l'équation (7).

De même, la fréquence d'atteinte est égale à la fréquence de départ, donnée par l'équation (6). Mais dans l'optique de l'évaluation du risque, les évènements à considérer sont les chutes dépassant une certaine énergie cinétique E_0, dont la valeur dépend de l'enjeu (elle ne sera pas la même pour un piéton que pour une maison).

Supposons dans un premier temps, que les compartiments qui s'éboulent ont tous la même largeur w et le même volume $V = kw^3$. Pour qu'un point quelconque en pied de falaise, d'abscisse x, soit atteint par un éboulement d'énergie supérieure à E_0, il faut que le centre de gravité de la masse éboulée se situe à une abscisse comprise entre x-w/2 et x+w/2, (c'est-à-dire dans une tranche verticale de falaise d'épaisseur w) et que le point de départ de l'éboulement se situe à une hauteur minimale h_0, telle que :

$$\gamma V h_0 > E_0 \text{ et } h_0 < h \tag{8}$$

γ étant le poids volumique de la roche et h la hauteur de la falaise. La fréquence d'atteinte d'un point quelconque avec une énergie supérieure à E_0 est donc :

$$F_a(E_0) = F_{st} w(h - h_0) \text{ avec } h_0 = \min\left(h, \frac{E_0}{\gamma V}\right) \tag{9}$$

Pour des compartiments de volume compris entre V et (V+dV), la fréquence d'atteinte d'un enjeu de largeur v, avec une énergie supérieure à E_0 est donnée par :

$$dF_a = (w + v)(h - h_0)dF_{st} \text{ avec } h_0 = \min\left(h, \frac{E_0}{\gamma V}\right) \tag{10}$$

Cette fréquence est nulle si γVh est inférieur à E_0. L'intégration de l'équation (10) doit donc se faire à partir de $V_{min} = E_0 / \gamma h$. On obtient ainsi une fréquence d'atteinte plus petite que la fréquence de départ F_r donnée par l'équation (6) :

$$F_a = F_r - \frac{3abk^{-\frac{1}{3}} E_0}{\gamma(3b+2)}\left(V_{min}^{-b-\frac{2}{3}} - V_{max}^{-b-\frac{2}{3}}\right) - \frac{abvE_0}{\gamma(b+2)}\left(V_{min}^{-b-1} - V_{max}^{-b-1}\right) \tag{11}$$

$$\text{avec } V_{min} = E_0 / \gamma h \tag{12}$$

Cette fréquence d'atteinte intègre des éboulements de tailles très différentes, qui comportent un ou plusieurs blocs. Pour certains éboulements de plusieurs blocs, toute l'énergie cinétique n'est pas répercutée sur l'enjeu. De plus, la perte d'énergie due à d'éventuels rebonds sur la paroi, n'est pas prise en compte. La fréquence réelle d'atteinte est donc surestimée par l'équation (11).

Si l'on admet que l'occurrence des évènements d'énergie supérieure à E_0 est régie par une loi de Poisson, la probabilité d'atteinte correspondante (l'aléa) est donnée par :

$$P_a = 1 - e^{-F_a t} = 1 - e^{-\frac{t}{T}} \tag{13}$$

L'hypothèse d'une falaise homogène est très simplificatrice. Si la fréquence de départ varie le long de la falaise, il en est de même de la fréquence d'atteinte. Dans le cas d'un enjeu fixe (une maison par exemple), l'aléa dépendra donc de l'abscisse x de celui-ci. La méthode proposée permet d'estimer l'ordre de grandeur de la fréquence d'atteinte, dans le cas où il n'est pas possible de distinguer dans la falaise des zones particulièrement dangereuses.

Dans le cas d'un enjeu mobile (véhicule ou piéton), la fréquence d'atteinte de celui-ci n'est pas affectée par les variations de la fréquence de départ suivant x. En effet, les zones les plus exposées sont compensées par les moins exposées.

4. Application à un itinéraire pédestre en pied de falaise

4.1. Estimation de l'aléa

La méthode décrite précédemment a été appliquée au sentier qui longe sur environ un kilomètre, le pied de la falaise du Saint-Eynard, bien visible depuis Grenoble. La hauteur de la falaise est d'environ 150 m. La fréquence spatio-temporelle d'éboulement est donnée par l'équation (2), les paramètres a et b ayant été estimés sur l'ensemble des 120 km de falaise de la région grenobloise. La largeur de l'enjeu (piéton) a été estimée à 0,5 m. L'énergie minimale considérée (0,025 kJ) correspond à une norme de casque d'escalade. Pour atteindre cette énergie cinétique, les compartiments se détachant du sommet de la falaise doivent avoir un volume minimal (donné par l'équation 12) de 6×10^{-6} m^3, ce qui correspond à une largeur de 2,3 cm. Le tableau I donne les fréquences d'atteinte obtenues en faisant varier dans leur plage d'incertitude, les paramètres a et b de la loi fréquence-volume.

Tableau 1. Fréquence d'atteinte d'un piéton avec une énergie d'au moins 0,025 kJ, sous une falaise de 150 m de hauteur (nombre de chutes par an).

a (10^{-7} chutes/an.m^2)	2,3	4,7	9,4
b = 0,45	$3,8 \times 10^{-3}$	$7,7 \times 10^{-3}$	$1,5 \times 10^{-2}$
b = 0,55	$1,1 \times 10^{-2}$	$2,3 \times 10^{-2}$	$4,5 \times 10^{-2}$
b = 0,65	$3,5 \times 10^{-2}$	$7,1 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^{-1}$

Compte tenu des incertitudes sur a et b, la fréquence d'atteinte a pu être déterminée à un facteur 10 près. La valeur centrale de $2,3 \times 10^{-2}$ chutes/an (ou $2,6 \times 10^{-6}$ chutes/h) correspond à une période de retour de 44 ans.

Les valeurs données dans le tableau I, avec 2 chiffres significatifs, sont valables pour toute valeur de V_{max} supérieure à 100 m^3. Elles sont donc très peu sensibles au choix du volume maximal possible d'éboulement. La contribution des plus gros volumes à la fréquence est d'autant plus faible que la valeur minimale à considérer est petite.

4.2. Analyse du risque

La probabilité d'atteinte d'un piéton qui parcourt le sentier en 1 heure est de $2,6 \times 10^{-6}$. En supposant qu'un piéton est tué s'il est atteint par une chute d'énergie supérieure à 0,025 kJ, un randonneur qui parcourt ce sentier une fois par an, augmente sa probabilité annuelle de décès d'environ 10^{-6} (*risque individuel*). Ce chiffre est à comparer au taux de mortalité annuelle de la population française, qui varie de 10^{-4} (pour un enfant de 10 ans) à 10^{-2} (pour une personne de 65 ans).

En termes de *risque sociétal*, en supposant qu'environ un millier de randonneurs peuvent emprunter le sentier chaque année, l'espérance mathématique du nombre annuel de victimes est de l'ordre de 10^{-3}. A la connaissance de l'auteur, aucun décès n'est à déplorer sur ce sentier, qui a été fréquenté pendant quelques décennies avant d'être interdit à la suite de deux éboulements de quelques dizaines de m^3, survenus en 2003 et 2006.

4. Conclusions

La méthode proposée permet d'estimer, à un facteur 10 près, la fréquence et la probabilité d'atteinte au pied d'une falaise homogène, à partir d'un inventaire historique d'éboulements. Avec un inventaire exhaustif sur quelques ordres de grandeur de volume, l'estimation peut être considérée par excès du fait des hypothèses simplificatrices adoptées.

La constitution d'inventaires (avec localisation, date, volume, dimensions), ainsi qu'une meilleure connaissance des taux de recul des parois, et donc des fréquences d'éboulement, sont nécessaires pour une meilleure quantification de l'aléa et du risque.

5. Références bibliographiques

Durville J-L. (2004) Quelques remarques sur l'emploi des probabilités dans le domaine des risques naturels, cas des mouvements de terrain . Bull. Laboratoires Ponts & Chaussées, 249, p. 3-17.

Dussauge-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, p. 15-26.

Effendiantz L., Guillemin P., Rochet L., Pauly J-C., Payany M. (2004) Les études spécifiques d'aléa lié aux éboulements rocheux, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 2004.

Frayssines M., Hantz D. (2006) Failure mechanisms and triggering factors in calcareous cliffs of the Subalpine Ranges (French Alps). Engineering Geology 86, p. 256-270.

Groupe Falaises, Programme Interreg 2C (2001) Prévention des mouvements de versants et des instabilités de falaises - Confrontation des méthodes d'étude des éboulements rocheux dans l'arc alpin.

Hantz D., Vengeon J.M., Dussauge-Peisser C. (2003) An historical, geomechanical and probabilistic approach to rock-fall hazard assessment. Natural Hazards and Earth System Sciences, 3, p. 693-701.

Hantz D., Frayssines, M. (2007) Contribution à l'évaluation de la durée de vie d'un compartiment rocheux susceptible de s'ébouler. Revue Française de Géotechnique, n°119, p. 65-79.

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 Février 2009.

Rat M. (2006) Optimisation de la gestion de la route du littoral à La Réunion vis-à-vis du risque de chutes de blocs. Bull. Laboratoires Ponts & Chaussées, 263-264, p. 43-52.

Vengeon J.M., Hantz D., Dussauge C. (2001) Prédictibilité des éboulements rocheux: approche probabiliste par combinaison d'études historiques et géomécaniques. Revue Française de Géotechnique, 95/96, p. 143-154.