

UN MODELE DE REcul DES FALAISES POUR EVALUER LES FREQUENCES D'ÉBOULEMENT

A MODEL FOR ROCK WALL RETREAT AND ROCK FALL FREQUENCY

Didier HANTZ¹, Lucilla BENEDETTI², Didier BOURLES², Julien CARCAILLET¹

1 ISTERre, Université Joseph Fourier, Grenoble, France

2 CEREGE, Aix-Marseille Université, France

RÉSUMÉ — L'évaluation quantitative de l'aléa d'éboulement diffus nécessite des inventaires d'éboulements, qui sont difficiles à établir pour les petits ou les gros volumes. Dans le cas des aléas localisés, une évaluation quantitative n'est pas possible dans l'état actuel des connaissances. Une relation en loi puissance entre fréquence et volume des éboulements est proposée pour mieux estimer les fréquences. Cette relation est utilisée pour construire un modèle de recul des parois, qui permet de déterminer leur âge. Ce modèle a été appliqué aux falaises calcaires de l'agglomération grenobloise. L'âge calculé est du même ordre de grandeur que l'âge moyen mesuré par la méthode des isotopes cosmogéniques. Les fréquences d'éboulement données par la loi puissance peuvent ainsi être utilisées pour une meilleure estimation des aléas diffus et localisés, pour toute la gamme des volumes d'éboulement.

ABSTRACT — Quantitative assessment of diffuse rock fall hazard needs rock fall inventories, which are difficult to obtain for small or large rock fall volumes. In the case of localized hazard, a quantitative assessment is not possible in the present state of knowledge. A power law relation between rock fall frequency and volume is proposed for a better estimation of the frequencies. This relation has been used to build a rock wall retreat model, which can determine the age of the rock surface. The model has been applied to the calcareous cliffs of the Grenoble area. The calculated age is of the same order of magnitude than the mean age measured using the cosmogenic nuclides. The rock fall frequencies given by the power law relation can thus be used for a better estimation of diffuse and localized hazard, for the whole range of rock fall volumes.

1. Introduction

L'évaluation de l'aléa d'éboulement rocheux, qu'il s'agisse d'un aléa localisé (masse rocheuse bien identifiée) ou diffus, reste un problème délicat pour les experts, qui ne peuvent souvent donner qu'un avis qualitatif. Dans le cas des aléas localisés, il n'existe pas de méthode géomécanique éprouvée permettant d'évaluer la durée de vie d'une masse rocheuse actuellement stable, mais potentiellement instable, et l'évaluation est basée sur l'observation des différents facteurs influant sur la stabilité (Groupe Falaises, 2001 ; Effendiantz *et al.*, 2004). Elle se traduit par une qualification

de la probabilité de rupture, généralement en cinq niveaux (très élevée, élevée, moyenne, faible ou très faible). Dans le cas d'un aléa diffus, on cherche à estimer la fréquence d'éboulement à partir d'inventaires historiques, qui ne portent que sur une plage limitée de volume (Hantz, 2010, 2011). En effet, les petits éboulements passent souvent inaperçus et les plus gros sont trop rares (parfois inexistant dans la période d'observation) pour que leur fréquence puisse être estimée.

Pour améliorer l'estimation de la fréquence des éboulements de différents volumes, une loi de distribution de ces volumes (ou relation fréquence-volume) a été proposée pour différents inventaires d'éboulements (Dussauge-Peisser *et al.*, 2002 ; Picarelli *et al.*, 2005), mais son extrapolation en dehors de la plage de volume observée est délicate. Pour être validée sur toute la gamme des volumes d'éboulement possibles, cette loi doit être compatible avec la vitesse de recul des falaises (estimée par une approche paléogéographique) et avec la durée de vie des parois rocheuses (estimée par datation aux isotopes cosmogéniques). Cette compatibilité peut être vérifiée grâce à un modèle géométrique de recul des falaises, qui relie les fréquences d'éboulement, la vitesse de recul des falaises et la durée de vie des parois (Hantz et Frayssines, 2006). Ce modèle est présenté dans la partie 2, puis la méthode de datation des parois dans la partie 3. Enfin dans la partie 4, le modèle est appliqué et, dans une certaine mesure, validé dans le cas des éboulements de l'agglomération grenobloise.

2. Le modèle de recul des falaises

2.1. Fréquence des éboulements en fonction du volume

Le nombre d'éboulements par unité de temps dans une paroi homogène donnée est une variable aléatoire, dont l'espérance est appelée fréquence d'éboulement. L'analyse de plusieurs inventaires portant sur des parois de caractéristiques géologiques et géomorphologiques différentes et sur des volumes compris entre 10^{-4} et 10^7 m³, montre que la fréquence cumulée des éboulements dans une paroi donnée, peut être ajustée par une loi puissance :

$$F = aV^{-b} \quad (1)$$

F étant la fréquence cumulée, b une constante voisine de 0,5 et a le nombre d'éboulements de volume supérieur à 1 m³ (si la loi est valable jusqu'à un tel volume). Ce nombre dépend de la taille de la zone considérée et des conditions géologiques et géomorphologiques. En revanche, les différentes analyses d'inventaire réalisées jusqu'à présent, semblent montrer que le paramètre b est relativement indépendant du contexte géologique et géomorphologique, et a une valeur de l'ordre de $0,55 \pm 0,15$ (Dussauge-Peisser *et al.*, 2002 ; Dewez *et al.*, 2009).

2.2. Vitesse de recul

Le volume total éboulé par unité de temps, correspondant à des éboulements de volume compris entre V_1 et V_2 , peut être obtenu en intégrant entre V_1 et V_2 , le volume V donné par l'équation (1) :

$$V_{1-2} = \frac{ab}{(1-b)} \left(V_2^{(1-b)} - V_1^{(1-b)} \right) \quad (2)$$

Le volume total éboulé par unité de temps (ou taux de recul volumique), tous volumes confondus, est obtenu en intégrant V entre 0 et le volume maximal possible V_{\max} :

$$V_t = \frac{a}{(1-b)} V_{\max}^{(1-b)} \quad (3)$$

Il correspond à la surface hachurée de la figure 1. Cette intégrale ne converge que si l'exposant b est inférieur à 1. Ce qui signifie que la loi puissance ne peut s'appliquer jusqu'aux plus petits volumes, que si b est inférieur à 1.

En divisant le volume total éboulé V_t par la surface totale de la paroi, on obtient la vitesse de recul de la paroi (R). Inversement, l'estimation de cette vitesse de recul par une approche géologique permet d'approcher la fréquence d'éboulement, en admettant que b est égal à 0,5.

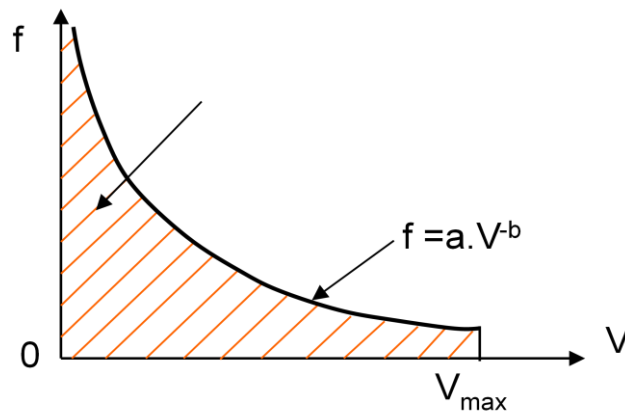


Figure 1. Relation fréquence-volume et taux de recul volumique (surface hachurée).

2.3. Durée de vie des parois

A un instant donné, la surface de falaise A_i constituée de cicatrices d'éboulements de la classe de volume (V_i, V_{i+1}) est égale à $V_{i-(i+1)}/R$, comme on peut le voir sur la figure 2, dans laquelle, pour simplifier, les éboulements d'une même classe ont tous le même volume (V_1, V_2 ou V_3).

On peut définir le taux de renouvellement de la surface A_i , par le rapport entre la surface de cicatrice B_i qui apparaît chaque siècle (illustrée par la figure 3) et A_i . Son inverse, A_i / B_i , est égal à la durée de vie moyenne T_i des cicatrices de la classe (V_i, V_{i+1}) , qui est aussi celle des compartiments rocheux de cette même classe. L'âge moyen de ces compartiments est égal à la moitié de leur durée de vie moyenne.

Pour chaque classe de volume, B_i peut être déterminé par intégration à partir de la loi de distribution des surfaces de cicatrice. Celle-ci peut être déterminée à partir d'un inventaire comportant ces surfaces ou d'une corrélation entre le volume et la surface des éboulements.

Connaissant l'âge moyen des compartiments de chaque classe de volume et la part de surface de paroi correspondante, il est possible de calculer un âge moyen correspondant à l'ensemble de la paroi. Cet âge moyen calculé à partir du modèle d'érosion, pourra être comparé à l'âge moyen mesuré sur les parois. L'âge d'une portion de paroi est défini comme la durée depuis laquelle elle est exposée à la lumière, consécutivement à l'éboulement d'un compartiment rocheux.

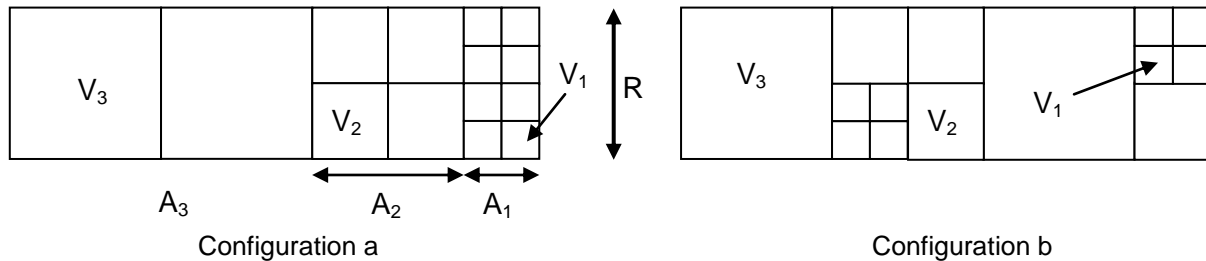


Figure 2. Modèles conceptuels bidimensionnels avec trois classes de volume d'éboulement (V_1 , V_2 , V_3), affectant respectivement des aires de falaise A_1 , A_2 , A_3 . Dans la configuration b, les aires A_1 , A_2 , A_3 correspondent à des portions de falaise qui varient dans le temps.

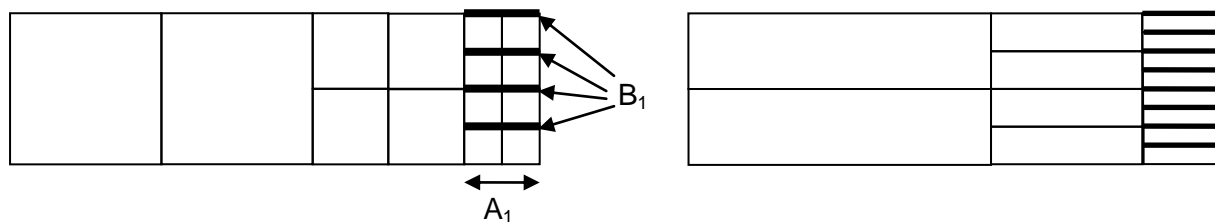


Figure 3. En supposant que les compartiments représentés s'éboulent en un siècle, la surface totale B_1 des cicatrices d'éboulements de la classe V_1 , qui apparaît chaque siècle, est représentée par les traits gras. La durée de vie moyenne d'une cicatrice est le rapport A_i / B_i .

3. La méthode de datation des parois

L'âge d'une portion de paroi rocheuse peut être déterminé par la méthode des nucléides cosmogéniques (Siame *et al.*, 2000). Ces nucléides se forment par interaction entre des particules chargées du rayonnement cosmique secondaire (majoritairement protons et particules α) et des atomes cibles de l'environnement terrestre. Dans les roches cristallines, ces cibles sont les atomes de silicium, qui se transforment en béryllium-10 (^{10}Be). Dans les roches carbonatées, ce sont les atomes de calcium, qui se transforment en chlore-36 (^{36}Cl). Les nucléides ainsi produits substituent les atomes cibles dans la structure cristalline. Ils sont donc conservés de manière durable dans les cristaux. Comme le rayonnement cosmique secondaire pénètre très peu dans la roche, les nucléides cosmogéniques ne se forment que lorsque celle-ci apparaît à la surface du massif, suite à un éboulement. Si un nucléide est stable, sa concentration augmente au cours du temps, proportionnellement à son taux de production (exprimé en $\text{at.g}^{-1}.\text{an}^{-1}$). S'il est

radioactif comme le sont le ^{10}Be et le ^{36}Cl , cette concentration sera modulée par la décroissance radioactive. L'âge d'une paroi peut donc être déterminé à partir de la concentration en nucléide cosmogénique. Un spectromètre de masse par accélérateur (ASTER, Accélérateur pour les Sciences de la Terre et les Risques), nécessaire pour mesurer cette concentration, a été construit au CEREGE, pour les applications des nucléides cosmogéniques aux Sciences de la Terre.

Pour déterminer l'âge d'une surface rocheuse, le taux de production caractéristique du site d'échantillonnage doit être calculé, à partir de son positionnement latitudinal, longitudinal et altitudinal, afin de corriger de l'effet du champ magnétique et de l'épaisseur d'atmosphère traversée (Siame *et al.*, 2000). Le rayonnement cosmique ne traversant pas la roche, il est également nécessaire d'estimer l'écrantage topographique à l'aide d'une boussole et d'un clinomètre. Dans une falaise verticale par exemple, cet écrantage réduit de 50 % le flux de rayonnement. Les surfaces surplombantes ne peuvent donc pas être datées.

4. Application aux falaises de l'agglomération grenobloise

4.1. Contexte géologique et géomorphologique

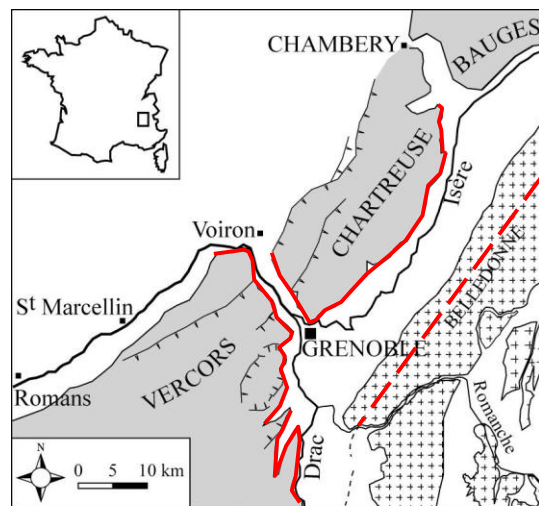


Figure 4. Carte géologique simplifiée des environs de Grenoble et localisation des falaises. Grisé : chaînes subalpines. Croix : massifs cristallins externes. Trait gras : falaises. Tirets : accident médian de Belledonne.

L'agglomération grenobloise est entourée de falaises calcaires, dont la hauteur est généralement comprise entre 50 et 400 m. Elles appartiennent aux chaînes subalpines, constituées de terrains sédimentaires essentiellement secondaires (figure 4). Le plus souvent, le pendage des strates, faible à moyen, est opposé au versant. Les configurations typiques d'instabilité ont été décrites par Frayssines et Hantz (2006). Les falaises sont constituées de calcaires urgoniens, valanginiens, tithoniques et séquanien. Ces couches calcaires, déposées au Jurassique supérieur et au Crétacé inférieur, ont commencé à être érodées au Miocène supérieur, il y a environ 10 millions d'années. D'après Arnaud (1979) et Gidon (1996), la limite

orientale de la plate-forme urgonienne à l'époque de sa formation correspondait à peu près à l'accident médian de Belledune (représenté sur la figure 4). Elle aurait donc reculé de 10-15 km en 10 millions d'années, soit un taux de recul moyen de l'ordre de 1-1,5 mm par an.

4.2. Fréquences d'éboulement, vitesse de recul et âge moyen des falaises

Tableau 1. Application du modèle d'érosion par éboulements aux falaises calcaires de l'agglomération grenobloise.

Classe de volume (m ³)	0-10 ²	10 ² -10 ³	10 ³ -10 ⁴	10 ⁴ -10 ⁵	10 ⁵ -10 ⁶	10 ⁶ -10 ⁷
Période d'observation		1935-2000	1935-2000	1935-2000	1800-2000	1600-2000
Nombre d'éboulements		33	9	6	3	2
Fréquence observée (par siècle)		51	14	9	1.5	0.5
Fréquence moyenne calculée		65	18	5	1.5	0.6
Taux volumique de recul par classe de volume (m ³ /siècle)	10 893	19 807	55 825	157 336	443 433	2,83 10 ⁶
Taux volumique de recul global	3 521 927					
Surface totale de falaise (m ²)	24 10 ⁶					
Vitesse de recul des falaises (m/siècle)	0,15					
Surface moyenne de falaise affectée par des éboulements de volume compris entre V _i and V _{i+1} (m ²)	0,07 10 ⁶	0,1 10 ⁶	0,4 10 ⁶	10 ⁶	3 10 ⁶	19 10 ⁶
Taux d'apparition de cicatrices (m ² /siècle)	27 264	14 240	21 677	33 000	50 235	150 769
Durée de vie moyenne des masses potentiellement instables (ans)	272	948	1 755	3 249	6 015	12 812
Durée de vie moyenne pondérée sur l'ensemble des falaises (ans)	11 000					

Les fréquences d'éboulement pour différentes classes de volume ont été déterminées grâce à un inventaire d'éboulements rocheux réalisé par le service RTM (Restauration des Terrains en Montagne) de l'Isère et complété par l'Université de Grenoble (Hantz *et al.*, 2003). Cet inventaire concerne des falaises bordant les massifs de la Chartreuse et du Vercors, dont la longueur cumulée et d'environ 120 km (figure 4). Elles 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. Les paramètres a et b de l'équation (1) ont été déterminés par régression linéaire à partir des fréquences cumulées d'éboulement. Les valeurs obtenues sont les suivantes : a = 1122 éboulements par siècle ; b = 0,55. Les fréquences observées et les fréquences moyennes calculées selon l'équation (1), par classe de volume, sont indiquées dans le tableau 1, ainsi que les taux volumiques d'érosion correspondants (équation 2), le taux volumique de recul

pour l'ensemble des falaises (équation 3) et la vitesse de recul associée. Le volume maximal d'éboulement possible a été estimé à 10^7 m^3 .

4.3. Age moyen des falaises

L'âge de la surface rocheuse a été déterminé sur dix échantillons, prélevés sur deux sites : les Rochers de la Bourgeoise (falaise urgonienne, altitudes comprises entre 1225 et 1276 m) et le Saint-Eynard (falaise tithonique, altitudes comprises entre 1175 et 1240 m). Les échantillons ont été prélevés en descendant sur corde dans les parois, à l'aide d'un marteau et d'un burin, en choisissant des surfaces représentatives. Les âges obtenus sont compris entre 2100 et 15 500 ans, avec une moyenne de 8500 ans. L'incertitude varie, selon les échantillons, entre 300 et 1900 ans. On n'observe pas de différence significative entre les deux sites (les âges moyens sont de 8 200 et 8 700 ans).

5. Discussion

On constate qu'en termes de volume, le recul est dû essentiellement aux plus gros éboulements : sur 3,5 millions de m^3 éboulés par siècle, 2,8 sont dus à des évènements de plus d'un millions de m^3 . On constate également que la vitesse de recul calculée (0,15 m/siècle) est du même ordre que celle obtenue par une approche paléogéographique (paragraphe 4.1), ce qui constitue une première validation du modèle de recul proposé. Il s'agit d'une vitesse moyenne. En réalité le recul se produit par étapes qui correspondent aux éboulements successifs. Pour le mesurer, il faudrait une période d'observation plus longue que la durée de vie des plus grosses masses potentiellement instables, c'est-à-dire plus de 10000 ans.

L'âge moyen mesuré (8500 ans) est sensiblement plus grand que l'âge donné par le modèle (5500 ans), mais l'ordre de grandeur est respecté. On peut considérer que le modèle de fréquence d'éboulement et de recul des parois est validé à un facteur 2 près, ce qui représente un progrès significatif dans la connaissance de ces phénomènes. Cependant, pour mieux juger de la validité du modèle, il faudrait comparer non seulement les moyennes, mais aussi les distributions des âges, et ceci à partir d'un plus grand nombre d'échantillons.

Le modèle proposé permet l'estimation des fréquences d'éboulement pour des plages de volume pour lesquelles il n'existe généralement pas d'inventaire (petits et gros volumes). Il permet donc une meilleure évaluation des aléas de rupture diffus, mais aussi des aléas localisés, lorsque ceux-ci sont étudiés à une échelle suffisamment large (Hantz et al., 2003 ; Hantz, 2011). En effet si, pour une plage de volume donnée, on peut estimer la fréquence moyenne d'éboulement dans une falaise, l'évaluation des probabilités de rupture des différents aléas localisés, doit être compatible avec celle-ci. Si, en prenant un exemple simple, les études menées sur une falaise conduisent à identifier vingt aléas ayant une probabilité d'occurrence moyenne (proche de 0,5) à l'échéance du siècle, alors que la fréquence moyenne de chute est de 1 évènement par siècle, on peut en conclure que l'évaluation des aléas a été trop pessimiste. En effet, l'espérance mathématique du nombre d'éboulements,

issue des études d'aléas localisés, est dans ce cas de l'ordre de 10, c'est-à-dire 10 fois supérieure à la fréquence estimée.

6. Conclusion

A partir de la relation fréquence-volume d'éboulement en loi puissance, un modèle de recul des parois est proposé, qui permet de d'estimer la durée de vie des compartiments rocheux et l'âge des surfaces rocheuses. Ce modèle a été appliqué aux falaises calcaires de l'agglomération grenobloise, sur lesquelles des mesures d'âge des surfaces rocheuses ont été effectuées par la méthode des nucléides cosmogéniques. L'âge moyen mesuré est en accord avec l'âge calculé par le modèle, à un facteur 2 près, ce qui valide les ordres de grandeur des fréquences estimées, notamment pour les plages de volume, pour lesquelles il n'existe pas d'inventaires. Cette estimation des fréquences permet une meilleure évaluation de l'aléa diffus, mais aussi des aléas localisés, lorsque ceux-ci sont étudiés à une échelle suffisamment large.

Le calcul des volumes éboulés par classe de volume montre que le recul est dû essentiellement aux plus gros éboulements.

Références bibliographiques

- Arnaud, H. (1979). Paleogeography of the Urgonian limestones of the Southern France. *Géobios, Mémoire spécial*, 3, 363-383.
- 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, 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*, pp, 86.
- Frayssines, M., Hantz, D. (2006). Failure mechanisms and triggering factors in calcareous cliffs of the Subalpine Ranges (French Alps). *Engineering Geology*, 86, 256-270.
- Hantz, D., Vengeon, J.M., Dussauge-Peisser, C. (2003). An historical, geomechanical and probabilistic approach to rock-fall hazard assessment. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 3, 693-701.
- Hantz, D., Frayssines, M. (2006). Contribution à la quantification temporelle de l'aléa éboulement, *Journées Nationales de Géotechnique et Géologie de l'Ingénieur*, Lyon, III-177-184.
- Hantz D. (2011). Quantitative assessment of diffuse rock fall hazard along a cliff foot, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, p.1303–1309.
- Picarelli, L., Oboni, F., Evans, S.G., Mostyn, G., Fell, R. (2005). Hazard characterization and quantification. In: *Landslide Risk Management*, Taylor & Francis Group, London, 27-61.
- Sime L.L., Braucher R., Bourlès D.L. (2000). Les nucléides cosmogéniques produits in-situ : de nouveaux outils en géomorphologie quantitative, *Bull. Soc. Géol. de France*, 171 (4), 383-396.