
Gestion de l'incertitude et de l'ignorance, dans l'évaluation de la probabilité de déclenchement des éboulements rocheux

Didier Hantz****

* *ISTerre, Université de Grenoble 1, CNRS
BP53, F-38041, Grenoble cedex 9*

** *Polytech Grenoble, Université de Grenoble 1
didier.hantz@ujf-grenoble.fr*

RÉSUMÉ. La méthodologie utilisée pour gérer le risque mouvement de pentes peut être appliquée aux éboulements rocheux. Les incertitudes qui affectent la caractérisation de l'aléa de rupture sont décrites. Elles expliquent que l'évaluation de l'aléa de rupture soit généralement effectuée de manière qualitative. De nouvelles approches sont proposées pour une évaluation quantitative de l'aléa rocheux. Dans le cas d'un aléa diffus, il est possible de quantifier la fréquence de rupture dans la paroi et la fréquence d'impact sur le versant en aval. La probabilité de rupture des aléas localisés est encore très difficile à déterminer. Le couplage de l'approche géomécanique qualitative, généralement utilisée, avec l'approche historique fondée sur l'analyse quantitative de la fréquence des éboulements, permet de vérifier la vraisemblance des prévisions. Une approche géomécanique quantitative est envisageable dans certains cas exceptionnels, où la structure interne de la paroi est suffisamment connue, mais elle doit être associée à l'approche historique.

ABSTRACT. The general methodology for landslide risk management can be applied to rock falls. The uncertainties which affect the failure hazard characterization are described. They explain that the rupture probability is usually estimated in a qualitative way. New approaches are proposed for a quantitative evaluation of rock fall hazard. For a diffuse hazard, failure frequency and impact frequency downslope can be quantified. The failure probability for localized hazards is difficult to estimate. Coupling the classical qualitative geomechanical approach with the frequency based historical approach allows to verify the plausibility of previsions. A quantitative geomechanical approach can be envisaged in some cases where the internal structure of the rock wall is sufficiently known, but it must be associated with an historical one.

MOTS-CLÉS : chute de roche, éboulement, aléa, probabilité de rupture, fréquence.

KEYWORDS: rock fall, hazard, failure probability, frequency.

1. Introduction

En accord avec la définition la plus récente adoptée par le JTC-1 (the joint ISSMGE, IAEG and ISRM Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes, Fell et al., 2008), un aléa peut être défini en Français, comme un évènement incertain pouvant conduire à des conséquences indésirables. Dans le cas des mouvements de pente, l'aléa est donc le mouvement potentiel d'une masse de terrain, ayant la capacité d'endommager des biens ou des personnes. Dans la pratique, le terme est aussi utilisé pour désigner la probabilité d'occurrence de l'évènement, la fréquence d'évènements de même type dans une zone donnée, ou la masse de terrain susceptible de se mettre en mouvement. Selon le JTC-1, un aléa se caractérise par la localisation et le volume de la masse potentiellement instable, le type et la vitesse du mouvement, et sa probabilité d'occurrence dans une période donnée. Le risque est une mesure à la fois de la probabilité et de la sévérité (ou gravité) des conséquences d'un évènement sur les personnes, les biens ou l'environnement.

Dans le cas des chutes de roche (ou éboulements rocheux), on distingue deux évènements dangereux, la rupture initiale (détachement ou départ d'un compartiment rocheux) et l'impact des blocs sur un enjeu. Le premier peut endommager des biens ou entraîner des personnes situées sur le compartiment, le second peut endommager les enjeux situés sur la trajectoire des blocs (cas le plus fréquent). Dans le second cas, l'aléa en un point quelconque d'un versant, se caractérise principalement par la probabilité que ce point soit impacté par un ou plusieurs blocs, avec une énergie cinétique minimale (Jaboyedoff et Labiouse, 2011). Pour être exhaustive, une étude d'aléa rocheux devrait déterminer des probabilités correspondant à différents niveaux d'énergie cinétique, ou inversement des énergies cinétiques correspondant à différents niveaux de probabilité. Des méthodes de simulation de la trajectoire d'un bloc ou d'une masse rocheuse ont été développées, qui permettent d'estimer la probabilité qu'un bloc atteigne un point donné avec une certaine énergie, sachant qu'il s'est détaché de la paroi (Dorren et al., 2011 ; Bourrier et Hungr, 2011). Mais pour déterminer la probabilité qu'un point soit impacté, il faut également connaître les probabilités de détachement (ou de rupture) des masses rocheuses susceptibles d'atteindre ce point. Le problème mécanique posé est celui de la détermination de la date d'occurrence d'un mécanisme de rupture. Du fait de la mauvaise connaissance de la structure interne des massifs rocheux, et des processus conduisant aux éboulements, il n'existe pas actuellement de méthode mécanique éprouvée permettant de déterminer le temps restant avant la rupture. Il existe seulement des méthodes cinématiques consistant à extrapoler des déplacements mesurés, qui ne sont applicables qu'à des sites surveillés, peu de temps avant la rupture (Azimi et Desvarreux, 1996 ; Rose et Hungr, 2007).

Cet article a pour objectif de préciser les incertitudes qui pèsent sur ce problème et de proposer des pistes vers une évaluation quantitative de la probabilité de chute d'un compartiment rocheux.

2. Méthodologie de gestion du risque chute de roche

Le processus de gestion du risque associé aux mouvements de pente en général peut être décrit par les étapes suivantes (d'après Fell et al., 2008) :

- Détection et caractérisation des phénomènes (type, intensité, extension spatiale, facteurs déclenchants)
- Evaluation de la probabilité d'occurrence ou de la fréquence
- Analyse des conséquences : identification et caractérisation des éléments exposés (valeur, vulnérabilité)
- Estimation du risque (vies humaines ou valeur)
- Acceptation ou non du risque
- Réduction éventuelle du risque (surveillance, stabilisation, protection, interdiction, déplacement)

Dans le cas des chutes de roche, la **détection** et la **caractérisation** sont basées sur la reconnaissance de mécanismes de rupture pouvant s'activer dans la paroi étudiée. Les principaux mécanismes de rupture possibles sont décrits notamment par Hantz et al. (2003) ou Effendiantz et al. (2004). Suivant le contexte, deux types d'approche peuvent être utilisés, la recherche d'**aléas de rupture localisés** ou d'**aléas de rupture diffus**. Dans le premier cas, on localise (en x, y, z) et on délimite (au moins en surface) les compartiments rocheux susceptibles de chuter ; dans le second cas, on définit les mécanismes susceptibles de s'activer (et éventuellement les volumes associés) dans une zone homogène, mais sans localiser les compartiments.

Selon l'approche utilisée dans l'étape de détection, l'étape suivante aura pour premier objectif soit d'évaluer les **probabilités de rupture** des compartiments identifiés précédemment, soit d'estimer les **fréquences de chute** pour chaque zone homogène et en fonction du volume (Hantz, 2011 ; Dussauge-Peisser et al., 2002 ; Durville, 2004). A partir de ces données, les fréquences ou les **probabilités d'impact** en tout point du versant, correspondant à différentes énergies cinétiques, doivent être déterminées (Jaboyedoff et Labiouse, 2011).

L'**analyse des conséquences** consiste à identifier et caractériser les éléments exposés, notamment leur **vulnérabilité**.

L'**estimation du risque** prend en compte les probabilités d'impact pour différentes énergies cinétiques, la vulnérabilité et la valeur des éléments exposés. Dans l'état actuel de la pratique, l'aléa et donc le risque rocheux, sont généralement évalués de manière purement qualitative, ce qui empêche toute comparaison entre risques et peut conduire à des choix irrationnels.

Contrairement aux étapes précédentes, l'**acceptation ou non du risque** ne relève plus de la compétence d'un bureau d'études, mais des pouvoirs publics ou des citoyens. Leroi et al. (2005) ont recensé des critères d'acceptabilité du risque humain

utilisés dans plusieurs pays, pour des risques industriels ou naturels. En termes de risque individuel, il ressort qu'une probabilité annuelle de décès de 10^{-6} est considérée comme acceptable dans presque tous les cas. Il ne semble pas exister de tels critères en France. En s'appuyant sur cette synthèse, le JTC-1 recommande les seuils suivants pour qualifier le risque :

- $>10^{-3}$ /an : risque très fort
- 10^{-4} à 10^{-3} /an : risque fort
- 10^{-5} à 10^{-4} /an : risque modéré
- 10^{-6} à 10^{-5} /an : risque faible
- $< 10^{-6}$ /an : risque très faible

Il ressort de ces chiffres qu'une estimation du risque humain à un facteur 10 près, permettrait une gestion plus rationnelle du risque rocheux. Si un grand nombre de personnes risquent d'être tuées par un seul évènement, il semble que la probabilité acceptable pour cet évènement diminue en fonction du nombre de personnes. Dans le cas de Honk Kong par exemple, si le nombre de victimes est multiplié par 10, la probabilité acceptable est divisée par 10 (Leroi et al., 2005).

Pour **réduire le risque**, différentes stratégies peuvent être appliquées. Leur description n'entre pas dans le cadre de cet article.

3. Les incertitudes dans la caractérisation de l'aléa de rupture

La date de rupture d'un compartiment rocheux dépend de son état de stabilité actuel **et de l'évolution de la stabilité au cours du temps.**

3.1. Incertitudes sur l'état de stabilité actuelle

Il existe des méthodes d'analyse mécanique relativement fiables permettant d'évaluer la stabilité d'une masse rocheuse (équilibre limite, éléments finis, éléments distincts), mais une grande incertitude pèse sur les paramètres mécaniques et les modèles géométriques nécessaires à leur mise en œuvre. Frayssines et Hantz (2009) ont analysé des ruptures survenues dans les falaises calcaires du Vercors, et ont montré que les résistances déterminées en laboratoire devaient être divisées par un facteur 2 à 3 pour expliquer les ruptures observées. Quant aux modèles géométriques, si la surface rocheuse peut être connue avec précision, les discontinuités ne sont visibles qu'en surface, et l'extrapolation en profondeur est très incertaine, notamment en ce qui concerne leur extension et la présence de ponts rocheux. Dans les études de renforcement ou de déblais, qui doivent garantir la stabilité, les bureaux d'études adoptent le principe de précaution en considérant généralement des discontinuités d'extension infinie. Mais ce principe ne peut pas être

appliqué lorsqu'il s'agit d'évaluer le risque. Il conduirait souvent à un coefficient de sécurité inférieur à 1 pour des compartiments qui sont stables depuis des millénaires. Depuis quelques années, l'utilisation de méthodes de prospection géophysique permet, dans certains cas, de réduire l'incertitude sur l'extension des discontinuités (Deparis et al., 2011 ; Lorier et al., 2010).

Compte tenu des incertitudes mentionnées, une approche probabiliste de la stabilité actuelle a été proposée (par exemple, Castelli et Scavia, 2007). Elle peut fournir, par exemple, la fonction de distribution du coefficient de sécurité actuel F , mais cette fonction doit expliquer la stabilité actuelle, autrement dit la probabilité que F soit inférieur à 1 doit être nulle.

3.2. Incertitude sur l'évolution de la stabilité

L'incertitude est beaucoup plus grande sur ce point, car les processus soupçonnés de déclencher les éboulements sont assez nombreux et on ne sait pas quels sont les plus importants. La rupture se produit lorsque les contraintes sur certaines discontinuités ou en certains points de la roche dépassent la résistance. On peut donc distinguer des processus qui diminuent la résistance des joints ou de la matrice rocheuse, d'autres qui augmentent les contraintes, cette augmentation pouvant être due à une modification de la géométrie du massif ou des forces agissant sur le compartiment considéré. Les différents processus qui doivent être envisagés sont décrits brièvement ci-dessous.

- a) Diminution de la résistance de la matrice rocheuse et des joints. Cette diminution peut être due à une croissance sous-critique des microfissures (lorsque la contrainte est proche de la résistance), à un effet de fatigue (chargement cyclique), à l'altération chimique des minéraux constituant la roche, au gel dans les vides (pores et microfissures) d'une roche saturée ou seulement à la saturation de la roche.
- b) Croissance des joints due au gel, à la dilatation de la glace, aux racines des arbres, à la dissolution des ponts rocheux, à une pression hydraulique, à la concentration de contrainte aux extrémités.
- c) Modification de la surface du massif, par érosion naturelle (écoulements d'eau, gélifraction superficielle, vent dans le cas de roches tendres, glissement d'une assise) ou excavation (talutage, sous-cavage).
- d) Modification lente de l'inclinaison du massif, due au fluage d'une assise ou à la déformation tectonique.
- e) Contraintes thermiques liées aux cycles thermiques.
- f) Déplacement d'un compartiment sous l'effet d'une pression hydraulique dans les joints (due par exemple au gel des exutoires).
- g) Forces d'inertie dues à des séismes ou des tirs de mine.

h) Surcharges (remblais, poids lourds, ...).

Ces processus peuvent interagir entre eux et il est très difficile de déterminer quels sont les plus importants pour un compartiment donné (même a posteriori dans une analyse en retour d'éboulement). La plupart d'entre eux agissent très lentement et sont difficiles à mettre en évidence. Leur étude constitue des axes de recherche qui doivent être développés.

Certaines ruptures peuvent être associées à un événement extérieur, météorologique ou sismique. Par exemple, Frayssines et Hantz (2006) ont montré que les éboulements de plus de 100 m³ dans les falaises calcaires des chaînes subalpines, sont 2,5 fois plus fréquentes les jours de gel-dégel. Le gel-dégel apparaît donc comme un **facteur déclenchant**. Mais cela ne prouve pas qu'il soit le seul facteur qui ait causé la rupture. En effet, lorsque l'évènement déclenchant est un évènement courant (de période de retour annuelle par exemple), et que le compartiment rocheux est en place depuis des millénaires, cela signifie qu'il a subi de nombreuses fois le même évènement sans que celui-ci ne provoque sa chute. Il y a donc forcément un **facteur dégradant** qui réduit progressivement la stabilité. Ce facteur peut être la répétition du facteur déclenchant lui-même, aussi bien qu'un autre facteur (figure 1). Dans le cas des chaînes subalpines, le fait que des éboulements se produisent également en été, prouve que d'autres processus interviennent. On constate qu'il n'est pas aisé d'identifier les processus qui conduisent aux éboulements, et encore moins de les prévoir par une modélisation mécanique.

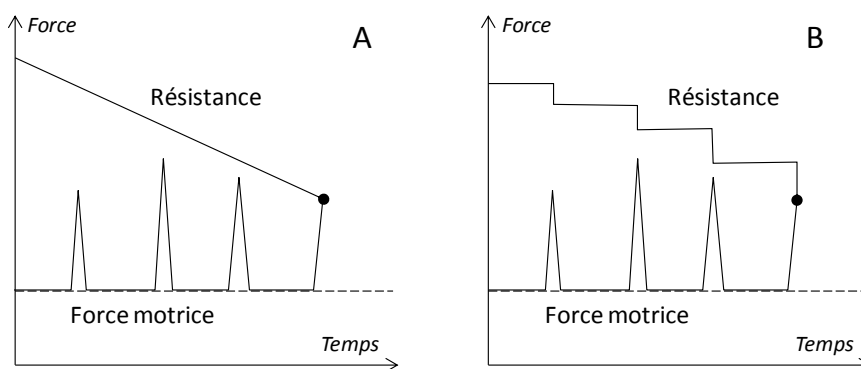


Figure 1. Evolution temporelle de la résistance et de la force motrice. Cas A : l'augmentation de la force motrice constitue le facteur déclenchant, mais pas un facteur dégradant. Cas B : l'augmentation de la force motrice constitue le facteur déclenchant, mais aussi un facteur dégradant.

3.3. Méthodes qualitatives et quantitatives de caractérisation de l'aléa de rupture

Compte tenu des incertitudes exposées précédemment, il n'est pas étonnant que la caractérisation de l'aléa en termes de probabilité de rupture, soit le plus souvent effectuée de manière qualitative (à dire d'expert), en analysant l'état de stabilité actuel et les processus d'évolution (Effendiantz et al., 2004). Ce type d'analyse peut être formalisé sous la forme d'un système de notation (Groupe Falaise, 2001). Depuis une dizaine d'années, des méthodes quantitatives ont été proposées, que l'on peut qualifier d'empiriques ou d'historiques, car elles sont essentiellement basées sur l'analyse du comportement passé des versants (Hungar et al., 1999 ; Hantz et al., 2003 ; Fell et al., 2005 ; Picarelli et al., 2005 ; Corominas et al., 2005 ; Jaboyedoff et al., 2005 ; Agliardi et al., 2009 ; Abbruzzese et al., 2009 ; Hantz, 2011). Des développements de ces méthodes sont proposés dans les paragraphes suivants.

4. Caractérisation quantitative des aléas de rupture diffus

Les éboulements sont des phénomènes répétitifs, qui constituent un des principaux processus d'érosion des reliefs. On peut définir leur **fréquence** (temporelle) dans une paroi donnée, comme étant le nombre moyen d'éboulements par unité de temps. L'expérience montre que les éboulements sont d'autant plus rares qu'ils sont volumineux. La fréquence de chute dans une paroi est donc une fonction décroissante du volume minimal considéré.

L'approche historique est basée sur l'hypothèse que cette fréquence est constante sur une période de quelques siècles, et donc que la fréquence déterminée à partir des éboulements des siècles passés peut être utilisée pour évaluer un **aléa diffus** à l'échéance d'un siècle. Elle suppose donc que les changements climatiques à l'échelle du siècle ont peu d'influence sur la fréquence des éboulements, ce qui semble une hypothèse raisonnable sauf pour les parois de haute montagne touchées par la remontée du permafrost.

On peut définir également une **fréquence spatio-temporelle**, qui représente le nombre d'éboulements (ou nombre de centres de gravité de compartiment éboulé) par unité de temps (année ou siècle) et par unité d'espace (surface ou longueur de falaise). Ce nombre est obtenu en divisant la fréquence temporelle par la surface (ou la longueur) de la paroi étudiée, dont la taille doit être plus grande que celle des éboulements. Cette fréquence spatio-temporelle n'a de signification que si elle est définie pour une portion de falaise suffisamment homogène. En revanche, il peut parfois être utile de déterminer une fréquence temporelle, même sur une zone non homogène. C'est le cas par exemple, lorsque l'on effectue une étude de risque sur un itinéraire : l'objectif est alors de connaître la probabilité d'accident pour un usager, quel que soit l'endroit où se produit l'accident. Si des mesures de protection doivent ensuite être prises, il est alors préférable de déterminer des fréquences par zone homogène et, si possible, de localiser les aléas.

Pour déterminer la fréquence d'impact sur un point situé dans le versant sous la paroi rocheuse, il faut d'abord déterminer la portion de paroi qui menace ce point. En fonction de l'enjeu considéré (piéton, voiture, bâtiment, infrastructure), il est nécessaire de considérer une énergie cinétique minimale, et donc un volume minimal (qui dépend de l'énergie potentielle du point le plus haut de la portion de paroi qui menace l'enjeu). En revanche, quelque soit l'enjeu, il faut a priori considérer le volume maximal possible d'éboulement, même si la fréquence associée est très faible. Il faut donc connaître la fréquence de chute pour une certaine plage de volume. Or, les inventaires historiques d'éboulements ne couvrent généralement pas toute la plage de volume nécessaire. Par exemple, pour les falaises de l'agglomération grenobloise, d'environ 120 km de longueur cumulée, un inventaire portant sur 65 ans a permis d'estimer les fréquences pour des volumes compris entre 10^2 et 10^5 m³. Il a fallu remonter sur 4 siècles pour aller jusqu'à 10^7 m³ (Hantz et al., 2003). Pour connaître la fréquence de chute correspondant à des volumes plus petits ou plus gros, il faut déterminer la loi qui relie la fréquence au volume. Il ressort de plusieurs analyses d'inventaires que la loi puissance est la mieux adaptée (Dussauge-Peisser et al., 2002). Selon cette loi, la fréquence F des éboulements de volume supérieur à V (fréquence cumulée) est donnée par la relation :

$$F = aV^{-b} \quad [1]$$

F étant la fréquence, 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 $0,55 \pm 0,15$. Ces dernières années, des inventaires portant sur des plus petits volumes d'éboulement ont pu être réalisés par comparaison de mesures laser ou photogrammétriques (Dewez et al., 2009 ; Chen, 2011). Leur analyse a montré que la loi puissance est également valable pour des volumes aussi petits que 10^{-4} m³. Pour les plus gros volumes, la rareté des événements peut être compensée par la longueur de la période d'observation et l'étendue de la zone d'étude. Grâce à la méthode de datation par les nucléides cosmogéniques, il est possible de dater les gros éboulements survenus depuis la fonte des glaciers würmiens, il y a plus de 10 000 ans (par exemple, Delunel et al., 2010).

Connaissant la fréquence de chute en fonction du volume, il est possible de simuler les trajectoires des compartiments rocheux et de déterminer la **fréquence d'impact** sur un point quelconque du versant, en fonction de l'énergie cinétique. Hantz (2010a, 2010b, 2011) a proposé une méthode analytique simple, permettant de déterminer la fréquence d'impact en pied de falaise, dans le cas d'une falaise rectiligne.

Le passage d'une fréquence à une **probabilité d'occurrence** nécessite de connaître la loi d'occurrence temporelle des éboulements. Si l'on admet que les éboulements sont des événements rares et indépendants, dont la probabilité d'occurrence est stationnaire, leur distribution temporelle peut être décrite par la loi de Poisson. Cette hypothèse nécessite que l'on travaille sur une zone de taille suffisante pour qu'elle comporte un grand nombre de compartiments susceptibles de tomber, à des stades d'évolution différents, et sur des intervalles de temps suffisants (Durville, 2004 ; Rat, 2006).

5. Vraisemblance de l'estimation qualitative des probabilités de rupture des aléas localisés

Les méthodes les plus utilisées pour caractériser les aléas localisés sont des méthodes qualitatives, qui se traduisent par une qualification de la probabilité de rupture en plusieurs niveaux. Dans le cas d'une qualification en 3 niveaux (probabilité élevée, moyenne ou faible), on peut raisonnablement associer les valeurs de probabilité suivantes à ces niveaux :

- probabilité forte : $p_1 = 0,9$
- probabilité moyenne : $p_2 = 0,5$
- probabilité faible : $p_3 = 0,1$

Si dans une paroi relativement homogène, pour une classe de volumes donnée et pour une période de prévision donnée (de durée T_p), une étude d'aléas localisés conduit à identifier n_1 compartiments de probabilité de chute 0,9, n_2 compartiments de probabilité de chute 0,5 et n_3 compartiments de probabilité de chute 0,1, l'espérance du nombre d'éboulements dans la période considérée s'écrit :

$$E(N) = \sum n_i p_i \quad [2]$$

Dans l'hypothèse d'une fréquence de chute stationnaire dans le temps (à l'échelle des périodes d'observation et de prévision), cette espérance devrait être égale au nombre de chutes déduit de la fréquence observée sur la paroi étudiée (FT_p) ou sur une zone plus large incluant la paroi étudiée (ou encore sur une paroi présentant des caractéristiques similaires). Si la différence est trop importante, on peut en conclure que le bureau d'études a été trop pessimiste ou trop optimiste (dans la détection ou dans la qualification des aléas), et que les aléas doivent être requalifiés. Si la différence est faible, le nombre d'aléas détectés et les probabilités de rupture estimées sont compatibles avec le comportement observé de la paroi. L'approche proposée, qui associe des démarches historique, géomécanique et probabiliste (approche HGP, Vengeon et al., 2001), permet de détecter des évaluations trop pessimistes ou trop optimistes, mais ne constitue pas une véritable validation.

6. Caractérisation quantitative des aléas de rupture localisés

Nous avons vu au paragraphe 3 que lorsque la structure interne de la falaise peut être connue (par des méthodes géophysiques par exemple), il est possible d'estimer quantitativement le degré de stabilité actuel d'un compartiment rocheux, mais pas de prévoir son évolution temporelle. Dans ce paragraphe, nous proposons deux démarches qui permettent d'améliorer certains modèles d'évolution de la stabilité.

6.1. Analyse en retour historique d'un éboulement

Les méthodes d'analyse de la stabilité des pentes utilisent le plus souvent un modèle de comportement instantané (élastoplastique par exemple). Lorsqu'elles sont utilisées pour prévoir le comportement d'un déblai ou d'un remblai, elles peuvent être évaluées si une rupture se produit pendant les travaux, car on sait qu'au moment de la rupture, le coefficient de sécurité valait 1. D'ailleurs des déblais ou des remblais ont parfois été réalisés dans le but d'effectuer une analyse en retour de la rupture (pour valider une méthode de simulation ou déterminer des paramètres mécaniques représentatifs de l'échelle du problème traité). Mais les processus qui conduisent aux éboulements dans les parois naturelles, se déroulent quant à eux sur des durées de l'ordre de plusieurs milliers d'années (Hantz et al., 2012). Il est donc impossible de valider à une échelle de temps humaine, une prévision de rupture mettant en jeu ces processus. En revanche il est possible d'effectuer une analyse en retour après un éboulement, à condition de savoir depuis combien de temps le processus étudié agit dans la paroi. Pour cela, il est possible de dater la surface des compartiments qui ont chuté, en utilisant la méthode des nucléides cosmogéniques (Delunel et al., 2010). On peut ainsi savoir quand cette surface a été exposée à ciel ouvert, à la suite d'un éboulement précédent. Cette durée d'exposition peut également être déterminée statistiquement à partir d'un modèle cinématique de recul des falaises (Hantz et Frayssines, 2009 ; Hantz, 2012).

La connaissance de la "durée de vie" d'un compartiment permet d'estimer, de manière statistique, l'accélération sismique maximale A_m qu'il a subie, et d'en tenir compte dans l'analyse en retour. L'estimation s'appuie sur le zonage sismique probabiliste de la France. Plus la durée de vie est longue, plus cette accélération est élevée. Lorsqu'elle s'est produite, le coefficient de sécurité avait une valeur S_1 nécessairement plus élevée qu'aujourd'hui, sinon le compartiment serait tombé (figure 2). On peut calculer cette valeur en fonction de A_m . Le coefficient de sécurité S a chuté de S_1 à 1 sur une durée inconnue, mais inférieure à la durée de vie du compartiment. On peut donc estimer par défaut le taux de variation moyen de S au cours du temps, c'est-à-dire la vitesse du processus de dégradation de la stabilité (figure 2).

Différents modèles de processus de dégradation peuvent être testés ou ajustés par analyse en retour historique. Frayssines (2005) a testé des modèles de dégradation

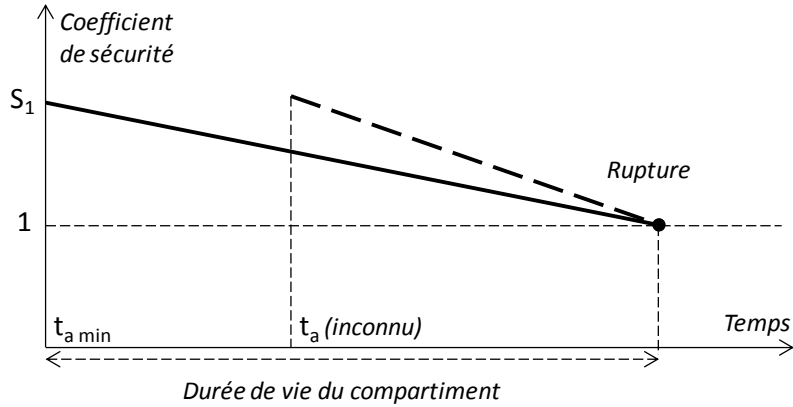


Figure 2. Evolution du coefficient de sécurité d'un compartiment rocheux qui a subi une accélération sismique. t_a : moment (inconnu) où le compartiment rocheux a subi l'accélération maximale A_m ; $t_{a \text{ min}}$: valeur minimale de t_a ; S_1 : valeur du coefficient de sécurité lors de l'accélération maximale subie.

par dissolution des ponts rocheux, par propagation de joint et par propagation de microfissures dans les ponts rocheux (fluage tertiaire).

6.2. Couplage des approches géomécanique et historique

Dans l'état actuel des connaissances, l'analyse géomécanique d'un compartiment rocheux ne permet pas de prévoir son évolution temporelle de manière suffisamment fiable. En revanche, l'approche historique permet de prévoir le comportement global d'une paroi, en termes de fréquence de chute. L'association des deux approches géomécanique et historique permet d'ajuster des modèles d'évolution de la stabilité. Le principe général de cette approche couplée consiste à ajuster un paramètre d'évolution temporelle de manière à obtenir, pour la paroi étudiée, la plage de volume et la période de prévision considérée, un nombre d'éboulements égal à celui qui peut être déduit de la fréquence observée. Elle suppose que les compartiments rocheux considérés subissent les mêmes processus de dégradation. Elle est explicitée ci-dessous dans le cas simple d'une décroissance linéaire du coefficient de sécurité.

Si le coefficient de sécurité S diminue linéairement avec un taux de décroissance d , le temps restant avant la rupture t_r s'écrit :

$$t_r = \frac{S - 1}{d} \quad [3]$$

Pour une valeur donnée de d , on peut calculer les temps avant rupture des différents compartiments détectés dans la paroi étudiée. On peut donc connaître, pour cette valeur de d , le nombre de chutes attendu durant la période de prévision considérée, de durée T_p . On peut ensuite chercher, par essais successifs, la valeur de d qui donne un nombre d'éboulements n égal à celui qui peut être déduit de la fréquence observée F ($n = FT_p$). On obtient ainsi les dates de chute des différents compartiments.

Une version simplifiée de la méthode consiste à classer les compartiments par ordre décroissant du coefficient de sécurité, et à considérer que les n premiers de la liste sont ceux qui chuteront durant la période de prévision.

7. Conclusion

Dans le cas d'un aléa diffus sur une zone homogène, il est possible de quantifier la fréquence de rupture dans la paroi et la fréquence d'impact en un point quelconque du versant en aval. La fréquence d'impact sur un itinéraire peut être déterminée même sur une zone non homogène.

La probabilité de rupture des aléas localisés est encore très difficile à déterminer. Le couplage de l'approche géomécanique qualitative, généralement utilisée, avec l'approche historique fondée sur l'analyse quantitative de la fréquence des éboulements, permet de vérifier la vraisemblance des prévisions. Une approche géomécanique quantitative est envisageable dans certains cas exceptionnels, où la structure interne de la paroi est suffisamment connue, mais elle doit être associée à l'approche historique.

Des recherches doivent être poursuivies pour améliorer la connaissance de la fréquence des éboulements, de la structure interne des parois et des processus conduisant aux éboulements.

Bibliographie

- Abbruzzese, J.M., Sauthier, C., Labiouse, V. (2009) Considerations on Swiss methodologies for rock fall hazard mapping based on trajectory modeling. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1095-1109.
- Agliardi, F., Crosta, G.B., Fratini, P. (2009) Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modelling techniques. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1059-1073.
- Azimi C, Desvarreux P, 1996. Quelques aspects de la prévision des mouvements de terrain. *Revue Française de Géotechnique*, 76: 63-75.

- Bourrier F., Hungr O. (2011) Rockfall dynamics: a critical review of collision and rebound models. *Rock Fall Engineering*, Eds Lambert & Nicot, Wiley, p.175-209..
- Castelli M., Scavia C. (2007) Rock Fall Susceptibility on a Large Scale: A Mechanical-Probabilistic Methodology, *11th Congress of the International Society for Rock Mechanics (ISRM 2007)*, Lisbon (Portugal), 9-13 July 2007.
- Corominas, J., Copons, R., Moya, J., Vilaplana, J.M., Altimir, J., Amigo, J. (2005) Quantitative assessment of the residual risk in a rockfall protected area. *Landslides*, 2, 343-357.
- Corominas J., Mavrouli O. (2011) Rockfall quantitative risk assessment. *Rock Fall Engineering*, Eds Lambert & Nicot, Wiley, p.255-301.
- Delunel R., Hantz D., Braucher R., Bourlès D., Schoeneich P., Deparis J. (2010) Surface exposure dating and geophysical prospecting of the Holocene Lauvitel rock slide (French Alps). *Landslides*, 7, 4, 393-400, DOI 10.1007/s10346-010-0221-0.
- Deparis J., Jongmans D., Garambois S., Lévy C., Baillet L., Meric O. 2010. Geophysical detection and characterization of discontinuities in rock slopes. *Rock Fall Engineering*, Eds Lambert & Nicot, Wiley, p.1-37.
- Dewez, T., Chamblas, G., Lasseur, E., Vandromme, R. (2009) Five seasons of chalk cliff face erosion monitored by terrestrial laser scanner: from quantitative description to rock fall probabilistic hazard assessment. *Geophysical Research Abstracts*, 11, EGU, 2009-8218.
- Dorren L., Domaas U., Kronholm K., Labiouse V. (2011) Methods for predicting rockfall trajectories and run-out zones. *Rockfall Engineering*, Eds Lambert & Nicot, Wiley, p.143-173.
- 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, 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: 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.
- Fell, R., Ho, K.K.S., Lacasse, S., Leroi, E. (2005) A framework for landslide risk assessment and management. In: *Landslide Risk Management*, Hungr, Fell, Couture & Eberhardt (eds), Taylor & Francis Group, London, 3-25.
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., and Savage, W.Z., 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning; *Engineering Geology*, v. 102, p. 85-98.
- Frayssines, M., Hantz, D. (2009) Modelling and back analysing failures in steep limestone cliffs. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 46, 1115-1123.

- 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: 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, 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 February 2009, 125-129.
- Hantz D. (2010a) Evaluation quantitative de l'aléa d'éboulement en pied de falaise. *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur*, Grenoble.
- Hantz D. (2010b) Evaluation de l'aléa de déclenchement des chutes de blocs. In : *Géomécanique des instabilités rocheuses, Traité MIM - Mécanique et ingénierie des matériaux*, Lavoisier.
- Hantz D. (2011) Quantitative assessment of diffuse rock fall hazard along a cliff foot. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11: 1303–1309.
- D. Hantz, Benedetti L., Boulrès D., Carcaillet J. (2012) Un modèle de recul des falaises pour évaluer les fréquences d'éboulement, *Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur*, Bordeaux.
- Hungr, O., Evans, S.G., Hazzard, J. (1999) Magnitude and frequency of rock falls and rock slides along the main corridors of southwestern British Columbia. *Can. Geotech. J.*, 36, 224-238.
- Jaboyedoff, M., Dudt, J-P., Labiouse, V. (2005) An attempt to refine rockfall hazard zoning based on the kinetic energy, frequency and fragmentation degree. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 5, 621–632.
- Jaboyedoff M., Labiouse V. (2011) Preliminary estimation of rockfall runout zones, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 11, p. 819-828.
- Leroi, E., Bonnard, Ch., Fell, R., McInnes, R.: Risk assessment and management. In: *Landslide Risk Management*, Hungr, Fell, Couture & Eberhardt (eds), Taylor & Francis Group, London, 159-198, 2005.
- Lorier L., Mathy A., Le Roux O. 2010. Apport des méthodes géophysique à la caractérisation d'aléas rocheux. *Rock Slope Stability 2010*, Paris.
- Picarelli, L., Oboni, F., Evans, S.G., Mostyn, G., Fell, R. (2005). Hazard characterization and quantification. In: *Landslide Risk Management*, Hungr, Fell, Couture & Eberhardt (eds), Taylor & Francis Group, London, p.27-61.
- 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.

- Rose N.D., Hungr O. (2007) Forecasting potential rock slope failure in open pit mines using the inverse-velocity method, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 44, 308–320.
- 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.