

# Contribution à l'évaluation de la durée de vie d'un compartiment rocheux susceptible de s'ébouler

**D. HANTZ**

Laboratoire  
de géophysique interne  
et tectonophysique, CNRS  
Observatoire de Grenoble  
Université Joseph-Fourier  
Grenoble, France

Maison des Géosciences  
BP 53, 38041 Grenoble  
Cedex 9  
didier.hantz@ujf-grenoble.fr

**M. FRAYSSINES**

Scetauroute, DGM  
3, rue du Dr Schweitzer  
38180 Seyssins  
magali.frayssines@egis.fr

## Résumé

Une nouvelle méthode d'analyse en retour d'éboulements rocheux est présentée, qui prend en compte, de manière probabiliste, les accélérations sismiques subies par les compartiments rocheux depuis qu'ils sont exposés à la surface des falaises. L'accélération minimale subie dépend de la durée d'exposition du compartiment, qui est estimée à partir d'un modèle d'érosion. Deux modèles expliquant la dégradation de la stabilité au cours du temps sont utilisés pour analyser trois éboulements survenus dans des falaises calcaires : l'un fait intervenir la dissolution, l'autre la propagation instable de la fissuration. Ces modèles, calés sur des cas réels, permettent d'estimer par excès, la durée de vie de compartiments rocheux potentiellement instables.

*Mots-clés* : aléa éboulement, prévision de la rupture, analyse en retour, dissolution, fluage tertiaire.

## A contribution to the evaluation of the life time of a potentially unstable rock compartment

## Abstract

A new method for rock fall back-analysis is proposed, which takes into account, in a probabilistic way, the seismic accelerations underwent by the rock compartments since they have been exposed at the cliff surface. The minimal underwent acceleration depends on the exposure time of the compartment, which can be estimated from an erosion model. Two models are proposed to explain the decrease of the stability with time, and they are applied to three failures occurred in limestone cliffs. The first one involves the limestone dissolution and the second one the unstable crack propagation. These models, which have been fitted with real cases, make it possible to estimate the life expectancy of potentially unstable rock compartments.

*Key words* : rock fall hazard, time to failure, back-analysis, dissolution, tertiary creep.

*NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 1<sup>er</sup> novembre 2007.*

## Introduction

Dans le domaine des risques naturels, l'aléa peut être défini comme la probabilité qu'un événement donné se produise en un lieu donné, dans une période donnée (cette période étant de l'ordre du siècle en cartographie de l'aléa). En un point donné, l'aléa éboulement est la probabilité qu'une masse rocheuse se détache d'une paroi voisine (rupture) et se propage jusqu'à ce point (propagation). Il existe plusieurs méthodes permettant de simuler la trajectoire de blocs rocheux et de calculer la probabilité qu'ils atteignent un point donné d'un versant. En revanche, il n'existe actuellement aucune méthode éprouvée permettant d'estimer la « durée de vie » d'une masse rocheuse potentiellement instable, que ce soit de manière déterministe ou probabiliste. Une évaluation probabiliste de la durée de vie permettrait de déterminer une probabilité de rupture en fonction du délai considéré, de la même manière que les sismologues déterminent la probabilité qu'un séisme d'intensité minimale se produise dans une période donnée, ou les hydrologues celle d'une crue d'intensité donnée.

La durée de vie d'un compartiment rocheux dépend d'un certain nombre de processus qui modifient les contraintes actives et la résistance des surfaces de glissement potentielles (Hantz, 2001; Hantz *et al.*, 2003). On peut distinguer des processus rapides et discontinus, comme les séismes et les mises en pression hydraulique, qui peuvent déclencher la rupture en peu de temps (facteurs déclenchants), et des processus relativement lents et continus (facteurs dégradants), qui provoquent une diminution progressive de la stabilité pouvant conduire à la rupture sans facteur déclenchant apparent. Parmi ceux-ci, on peut citer l'altération, la dissolution (pour les roches solubles comme le calcaire), les cycles gel-dégel, les cycles thermiques, le fluage des assises, les déformations tectoniques, la propagation lente des fissures et les phénomènes de fatigue dus à des sollicitations sous-critiques répétées. Si les valeurs actuelles de la contrainte active et de la résistance sont connues et supposées constantes, une prévision probabiliste de l'accélération sismique et de la pression hydraulique permet théoriquement de déterminer, en fonction du délai, la probabilité d'une rupture due à ces facteurs. Dans ce contexte d'évaluation de l'aléa, les valeurs adoptées doivent être les plus probables et ne doivent pas être affectées d'un coefficient de sécurité (partiel ou global), comme c'est généralement le cas dans les calculs de dimensionnement visant à garantir la sécurité d'une pente; de même, les modèles géomécaniques adoptés doivent être les plus réalistes et non les plus pessimistes (Hantz, 2001).

Dans l'état actuel des connaissances, l'évaluation de la probabilité d'une rupture provoquée ou favorisée par les processus dégradants, n'est pas envisageable car la connaissance quantitative de ces processus est encore insuffisante. Dans les calculs effectués pour le dimensionnement de pentes rocheuses, la réduction de stabilité due aux facteurs dégradants est généralement négligée, compte tenu de la marge de sécurité qui est prise. Le taux de dissolution du calcaire massif a été estimé localement à partir d'expériences sur des plaquettes (Kupper, 1981), ou à l'échelle d'un massif, à partir d'analyses hydrogéochimiques (Delanoy, 1984). Les valeurs obtenues sont respectivement de l'ordre de  $10^{-5}$  et  $10^{-4}$  m/an. L'influence des cycles gel-dégel sur la fracturation de la roche a été mise en évidence *in situ* (Rovera, 1997) et en laboratoire (Frays-

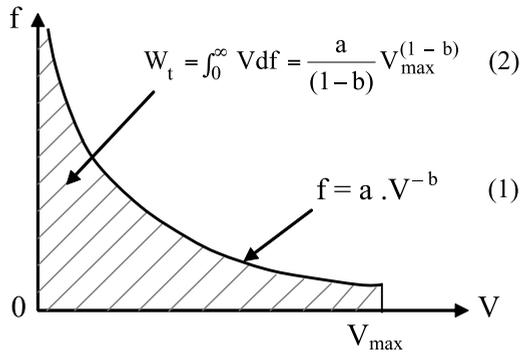
sines, 2005). L'influence des cycles thermiques a été modélisée par Gunzberger *et al.* (2005). La propagation sous-critique des fissures a été étudiée à l'échelle macroscopique en réalisant des essais de compression de longue durée sur des échantillons rocheux (Lama et Vutukuri, 1978; Genevois et Prestininzi, 1979; Kranz, 1980). Des lois reliant la contrainte appliquée au temps à la rupture ont été proposées et utilisées pour simuler numériquement les essais (Amitrano et Helmstetter, 2006). La propagation sous-critique a également été étudiée à l'échelle de la fissure, en utilisant la théorie de la mécanique de la fracture (Atkinson, 1984). Cette théorie a été appliquée sur un cas d'école, pour prévoir l'évolution de la stabilité d'un bloc pouvant glisser sur un joint comportant des ponts rocheux (Kemeny, 2003), mais la détermination des paramètres du modèle est délicate.

Dans ce travail, nous avons tenté d'appréhender quantitativement l'évolution de la stabilité des pentes rocheuses, en effectuant des analyses en retour « historiques » d'éboulements rocheux. L'analyse en retour classique, que l'on peut qualifier d'« instantanée », permet d'estimer certaines caractéristiques mécaniques du massif rocheux au moment de la rupture, en considérant que l'équilibre limite a été atteint (coefficient de sécurité = 1) sous certaines sollicitations connues (pression interstitielle, accélération sismique ou surcharge statique par exemple). L'analyse en retour historique, quant à elle, a pour objectif de prendre en compte l'historique des sollicitations subies par la masse éboulée depuis qu'elle est en situation d'instabilité potentielle. Cette situation survient à la suite d'éboulements précédents, qui s'inscrivent dans le processus de recul de la paroi. Les sollicitations que nous avons prises en compte, de manière probabiliste, sont les sollicitations sismiques. Nous nous sommes appuyés sur les études de sismicité historique, qui permettent d'estimer, pour une région donnée, les accélérations sismiques correspondant à différentes périodes de retour. Nous avons donc pu estimer, avec un certain risque probabiliste, l'accélération minimale qu'a subie un compartiment rocheux potentiellement instable, en fonction de son « âge » (durée depuis laquelle il est en situation d'instabilité potentielle).

Cet âge a été appréhendé grâce à un modèle simple d'érosion de versant, basé sur les fréquences d'éboulement (Hantz *et al.*, 2002; Hantz et Fraysines, 2005). Ce modèle permet de montrer que la durée de vie moyenne des masses rocheuses éboulées dépend de leur volume (les plus gros volumes ayant statistiquement une durée de vie plus longue). Pour chaque éboulement étudié, nous avons ainsi pu estimer, en fonction de son volume, la durée la plus probable pendant laquelle la masse rocheuse potentiellement instable a été soumise aux accélérations sismiques. Nous avons ensuite déterminé, à partir du zonage sismique de la France, l'accélération ayant une probabilité de 95 % d'être dépassée sur cette durée. Il est donc possible d'estimer par défaut le degré de stabilité passé des masses rocheuses éboulées et d'appréhender son évolution au cours du temps.

## Durée de vie moyenne des masses rocheuses

L'évaluation de la durée de vie moyenne des masses rocheuses est basée sur un modèle d'érosion par ébou-



**FIG. 1** Fréquence cumulée d'éboulement  $f$  en fonction du volume  $V$  (équation 1) et taux volumique d'éboulement (équation 2). Pour les falaises calcaires de l'agglomération grenobloise,  $a = 1122$  et  $b = 0,55$ .  
 Cumulated rock fall frequency  $f$  as a function of the rock fall volume  $V$  (équation 1), and volumetric rock fall rate (equation 2). For the limestone cliffs of the Grenoble area,  $a = 1,122$  et  $b = 0.55$ .

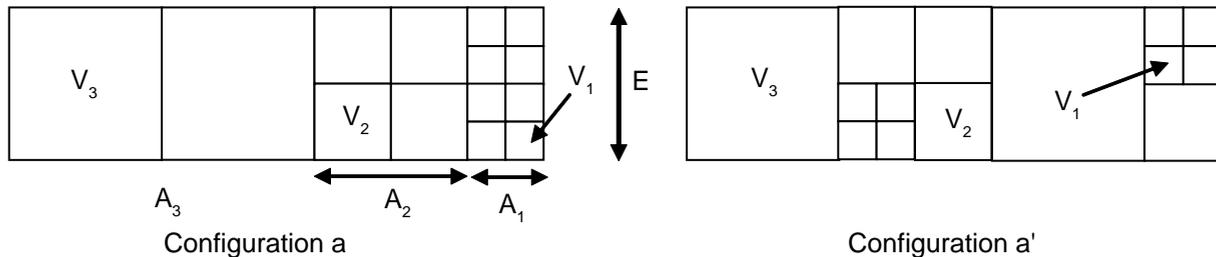
lement, établi à partir de l'analyse d'inventaires d'éboulements (Hantz et Frayssines, 2005). L'analyse d'un certain nombre d'inventaires d'éboulements (Wieczorek, 1992 ; Hungr *et al.*, 1999 ; Vengeon *et al.*, 2001 ; Dussauge-Peisser *et al.*, 2002) a montré que la distribution des volumes d'éboulement dans une zone homogène obéit à une loi puissance (Fig. 1). Dans l'équation 1 de la figure 1,  $f$  représente la fréquence d'éboulements (nombre d'éboulements par siècle) de volume supérieur à  $V$ . l'analyse d'inventaires portant

sur des zones différentes, montre que le paramètre  $a$  dépend fortement du contexte géologique et géomorphologique, alors que  $b$  est toujours voisin de 0,5. Cette loi permet, par intégration, de calculer le taux volumique d'éboulement  $W_t$  (volume éboulé par siècle), qui dépend du volume d'éboulement maximal possible  $V_{max}$  (Hantz *et al.*, 2002). Il est donné par l'équation 2 dans la figure 1. Connaissant la surface totale  $S$  de la falaise considérée dans l'inventaire, on peut en déduire le taux d'érosion par éboulement  $E$  (vitesse moyenne de recul de la falaise) :  $E = W_t/S$ .

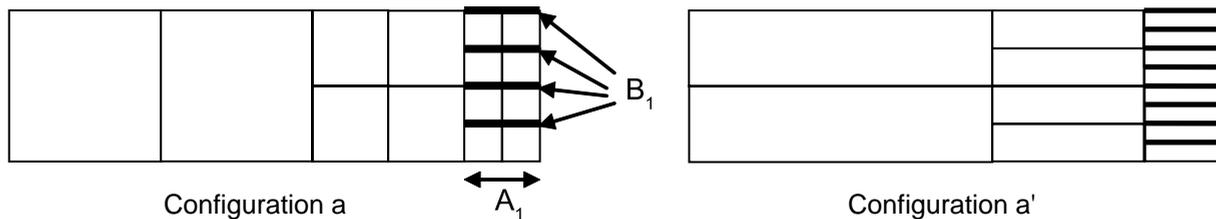
Une intégrale du même type que celle de l'équation 2 (Fig. 1) permet de calculer le taux volumique d'éboulement  $W_i$  correspondant à une classe de volume ( $V_i, V_{i+1}$ ) (Hantz *et al.*, 2002).

A un instant donné, la surface de falaise  $A_i$  constituée de cicatrices d'éboulements de la classe ( $V_i, V_{i+1}$ ) est égale à  $W_i/E$ , 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  $V_3$ ).

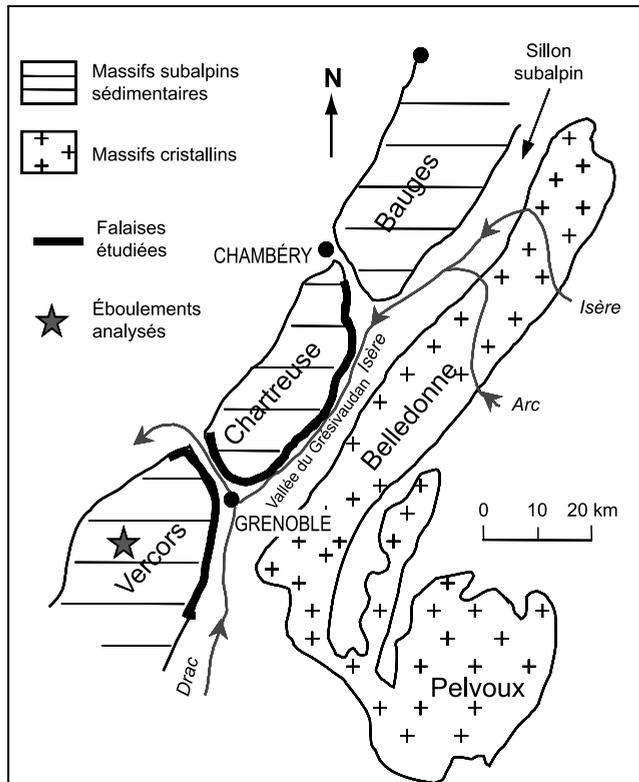
On peut définir le taux de renouvellement de la surface  $A_i$  par le rapport entre la surface de cicatrice  $B_i$  qui apparaît chaque siècle (représentée en trait gras sur la figure 3 pour la classe de volume la plus petite) et  $A_i$ . Son inverse,  $A_i / B_i$ , est égal à la durée de vie moyenne  $T_i$  des cicatrices de la classe ( $V_i, V_{i+1}$ ), qui est aussi celle des compartiments rocheux de cette même classe. 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 (Frayssines, 2005).



**FIG. 2** Modèles conceptuels bidimensionnels de falaise (vue de dessus) avec trois classes de volumes 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.  
 Conceptual two-dimensional models (view from above) with three rock fall volume classes ( $V_1, V_2, V_3$ ), corresponding respectively to cliff surfaces  $A_1, A_2, A_3$ . In the b configuration, the surfaces  $A_1, A_2, A_3$  correspond to cliff sectors which vary with time.



**FIG. 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  $A_1/B_1$ . La configuration a' se distingue par une forme différente des compartiments.  
 Assuming the displayed compartments will fall in one century, the total surface  $B_1$  of the rock fall scars for the volume class  $V_1$ , which appears in one century, is represented by the thick lines. The average life expectancy of a scar is given by  $A_1/B_1$ . The configuration a' is different shaped by the form of the compartments.



**FIG. 4** Contexte géologique de la région grenobloise. Trait gras : falaises concernées par l'inventaire d'éboulements. Etoile : localisation des 3 éboulements analysés.

Geological scheme of the Grenoble area. Bold line : cliffs considered for the rock fall inventory. Star : location of the 3 analyzed rock slides.

Le modèle d'érosion par éboulements a été appliqué aux falaises calcaires de l'agglomération grenobloise, pour lesquelles un inventaire d'éboulements avait été réalisé par le service RTM de l'Isère (1996). Les falaises concernées sont représentées sur la figure 4. L'application de ce modèle suppose que ces falaises, constituées de calcaire massif, ont une vitesse de recul homogène dans l'espace, à une échelle de temps géologique. Cette hypothèse est suggérée par la forme

relativement rectiligne des lignes de crête. Les résultats obtenus, qui doivent être considérés comme des ordres de grandeur, sont présentés dans le tableau I. On constate que le taux de recul (taux linéaire d'érosion) est de l'ordre du km par million d'années, ce qui est compatible avec le recul de la limite orientale de la plate-forme urgonienne, qui est de l'ordre de 10 km en 10 millions d'années (Arnaud, 1979). Les âges obtenus seront confrontés aux résultats de datations par la méthode des isotopes cosmogéniques (Siame *et al.*, 2000).

**3**

### Estimation probabiliste des accélérations sismiques

Pour estimer, de manière probabiliste, les accélérations sismiques qui ont affecté les falaises, nous avons utilisé l'étude réalisée par GEO-TER (2002) pour la révision du zonage sismique de la France. Cette étude, qui s'appuie sur les séismes historiques des mille dernières années, fournit pour un certain nombre de villes, des courbes taux de dépassement – accélération correspondant aux différentes zones sources possibles. En additionnant les taux correspondant à différentes zones sources, on peut obtenir la loi de fréquence cumulée des accélérations. Pour la ville de Grenoble, on obtient la loi suivante :

$$\log f = 2,65 \log a - 1,83 \tag{1}$$

f étant la fréquence (par année) des séismes d'accélération maximale supérieure à a (en m/s<sup>2</sup>). En admettant que l'occurrence des séismes obéit à une loi de Poisson, la probabilité P qu'une accélération de fréquence f ait été dépassée au moins une fois dans une période T est :

$$P(T) = 1 - e^{-fT} \tag{2}$$

On peut donc affirmer avec un risque d'erreur de 5 %, qu'au moins une accélération de fréquence f, donnée par l'équation suivante, s'est produite pendant la période T :

$$1 - e^{-fT} = 0,95 \tag{3}$$

**TABEAU I** Application du modèle d'érosion par éboulements aux falaises calcaires de l'agglomération grenobloise. Application of the rock fall erosion model to the limestone cliffs of the Grenoble area.

Classe de volume (m <sup>3</sup> )	0-10 <sup>-2</sup>	10 <sup>2</sup> -10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup> -10 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup> -10 <sup>5</sup>	10 <sup>5</sup> -10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup>
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 d'érosion par classe de volume (m <sup>3</sup> /siècle)	10 893	19 807	55 825	157 336	443 433	2,83 10 <sup>6</sup>
Taux volumique d'érosion global			3 521 927			
Surface totale de falaise (m <sup>2</sup> )			24 10 <sup>6</sup>			
Taux linéaire d'érosion (m/siècle)			0,15			
Surface moyenne de falaise affectée par des éboulements de volume compris entre V <sub>i</sub> and V <sub>i+1</sub> (m <sup>2</sup> )	0,07 10 <sup>6</sup>	0,1 10 <sup>6</sup>	0,4 10 <sup>6</sup>	10 <sup>6</sup>	3 10 <sup>6</sup>	19 10 <sup>6</sup>
Taux d'apparition de cicatrices (m <sup>2</sup> /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
Accélération subie avec une probabilité de 95 % (m/s <sup>2</sup> )	1,12	1,79	2,26	2,85	3,60	4,78



**FIG. 5** Les taches claires dans la falaise grise sont les cicatrices des éboulements de Chalimont (à gauche) et du Pas du Fouillet (à droite).

The bright spots in the grey cliff are the scars of the Chalimont (left) and Pas du Fouillet (right) rock falls.

La valeur de l'accélération correspondant à cette fréquence est donnée par l'équation (1). Les valeurs des accélérations ayant affecté les falaises de l'agglomération grenobloise avec une probabilité de 95 %, sont données dans la dernière ligne du tableau I, pour les durées de vie correspondant à chaque classe de volume.

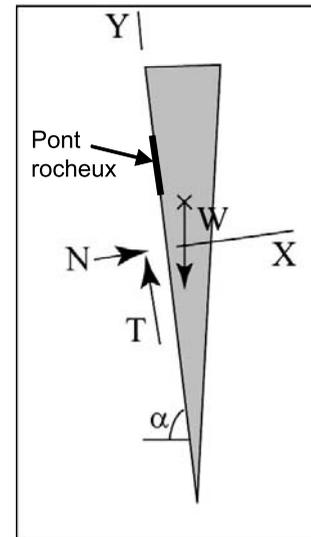
#### 4

## Éboulements analysés

Nous avons analysé trois éboulements, qui se sont produits dans des falaises de calcaire urgonien du Vercors (Fig. 4) : l'éboulement de la Vierge du Vercors (117 m<sup>3</sup>), celui de Chalimont (48 m<sup>3</sup>) et celui du Pas du Fouillet (24 m<sup>3</sup>). Les deux derniers sont présentés sur la figure 5. Leur description détaillée a été faite par Frayssines (2005) et résumée par Frayssines et Hantz (2006). Les mécanismes de rupture étaient des glissements sur des diaclases, de pendage 80° vers le vide. Ces diaclases appartiennent à une des principales familles de discontinuités, qui correspond au plan moyen de la falaise et prédécoupe des écaïlles potentiellement instables. Celles-ci peuvent être délimitées latéralement par des joints appartenant à une seconde famille subverticale, perpendiculaire à la falaise, ou se terminer en biseau. Dans un profil vertical, elles sont interrompues vers le haut par des joints de stratification subhorizontaux et se terminent en biseau vers le bas (Fig. 6). Les glissements sont dus à la rupture de ponts rocheux, dont la surface représente moins de 1 %

**TABEAU II** Caractéristiques mécaniques instantanées du calcaire urgonien.  
Instantaneous mechanical parameters of the Urganian limestone.

Paramètre	Moyenne	Écart-type	Min	Max	Nombre d'essais
Résistance en compression uniaxiale (MPa)	142	21	93	177	8
Résistance en traction (MPa)	7	3	3	12	19
Cohésion (MPa)					3
( $0 \leq \sigma_3 \leq 10$ MPa)		23	3		triaxiaux
Angle de frottement	54	3			
Module d'Young (GPa)	68	7	59	77	6



**FIG. 6** Schéma d'un glissement rocheux. Le trait gras représente un pont rocheux. W : poids du bloc. N, T : réactions normale et tangentielle.

Scheme of a rock slide. The bold line represents a rock bridge. W : weight of the block. N, T : normal and tangential reactions.

de la surface totale de la cicatrice, bien visible a posteriori grâce à la différence de couleur avec la surface patinée de la falaise, de couleur grise (Fig. 5). En dehors des ponts rocheux, les cicatrices sont couvertes d'une croûte de calcite indiquant que les diaclases étaient ouvertes avant le glissement. On peut donc considérer que les efforts étaient concentrés sur les ponts rocheux et que le glissement est dû à la rupture de la matrice calcaire qui les constituait. Des essais triaxiaux ont permis de déterminer le critère de rupture instantané du calcaire urgonien. Les valeurs obtenues sont données dans le tableau II.

#### 5

## Analyses en retour

Deux processus différents de dégradation ont été envisagés séparément : la dissolution du calcaire et la propagation instable de fissures, aboutissant à la rupture après un fluage tertiaire de durée égale à l'âge des compartiments. Dans la première hypothèse, nous avons négligé le fluage et considéré que la contrainte de cisaillement sur le pont rocheux au moment de la rupture était égale à la résistance au cisaillement instantanée de la roche, donnée par le critère de Mohr-Coulomb. De plus, nous avons pu estimer par défaut,

l'effort résistant mobilisable au moment où le compartiment a été exposé à la surface de la falaise, suite à un éboulement antérieur, en considérant que celui-ci a résisté à l'accélération sismique calculée au paragraphe 3. Cet effort résistant initial était supérieur à l'effort résistant mobilisé lors de la rupture, la différence entre les deux étant due à la diminution de la surface des ponts rocheux par dissolution de la calcite. Dans la seconde hypothèse, la dissolution a été négligée, et nous avons considéré que la contrainte de cisaillement sur le pont rocheux à la rupture s'exerçait de manière permanente depuis un temps égal à la durée de vie moyenne des compartiments, estimée au paragraphe 2. Dans ce cas, la résistance au cisaillement instantanée a été estimée par défaut en considérant que le compartiment avait résisté à l'accélération sismique calculée au paragraphe 3.

## 5.1

## Dégradation par dissolution

La condition de rupture est donnée par l'équation suivante, qui exprime l'équilibre limite des forces dans la direction du glissement (axe Y de la figure 6) :

$$W \sin \alpha = W \cos \alpha \tan \Phi + c S_r \quad (4)$$

$W$  étant le poids du compartiment,  $S_r$  la surface de pont rocheux au moment de la rupture,  $\alpha$  l'inclinaison du plan de glissement,  $c$  et  $\Phi$  la cohésion et l'angle de frottement du calcaire. Cette condition fournit une relation entre  $c$  et  $\Phi$ . Hoek et Brown (1980) ont montré que la pente du critère de rupture de la roche intacte (à l'échelle de l'échantillon) est une caractéristique intrinsèque à la nature de la roche, contrairement à la résistance en compression simple, qui peut varier de manière importante d'un échantillon à l'autre d'une même roche, notamment en fonction de la microfissuration. À l'échelle du massif rocheux, la pente du critère est affectée par la fracturation, mais de manière moins sensible que la résistance en compression simple. Les ponts rocheux étant constitués de roche intacte, nous avons adopté pour  $\Phi$  la valeur déterminée en laboratoire. Mais nous avons considéré que leur cohésion pouvait être affectée par un effet d'échelle, qui a été observé par plusieurs auteurs en comparant les résistances d'échantillons de tailles différentes (Goodman, 1989). Nous avons donc calculé les valeurs de  $c$  expliquant les ruptures à partir de l'équation (4). Ces valeurs sont données dans le tableau III. On constate que les cohésions obtenues sont 2 à 6 fois plus faibles que celles obtenues à l'échelle de l'échantillon. Cette différence peut être attribuée à un effet d'échelle, entre celles des ponts rocheux (de l'ordre de  $10^{-1} \text{ m}^2$ ) et des échantillons (de l'ordre de  $10^{-3} \text{ m}^2$ ), mais aussi par le fait que les ponts rocheux pourraient pré-

senter une microfissuration plus importante que les échantillons (qui n'ont pas été prélevés dans des ponts rocheux).

Lorsque le compartiment a résisté à l'accélération  $a = kg$  calculée au paragraphe 3 ( $g$  étant l'accélération de la gravité), la condition suivante était remplie :

$$W (\sin \alpha + k \cos \alpha) < W (\cos \alpha - k \sin \alpha) \tan \Phi + c S \quad (5)$$

La surface  $S$  de pont rocheux à cet instant inconnu peut donc être estimée par défaut à partir de cette inégalité. La surface de pont rocheux diminuant au cours du temps, la surface  $S_i$  au moment où le compartiment a été exposé à la surface de la falaise est supérieure à  $S$ . L'inégalité (5) donne donc une estimation par défaut de la surface initiale  $S_i$  de pont rocheux. Il est donc possible d'évaluer par défaut le taux de décroissance de cette surface et la vitesse linéaire de dissolution. Les valeurs obtenues pour les trois éboulements analysés sont données dans le tableau III. Elles sont compatibles avec les vitesses de dissolution données dans la littérature (de l'ordre de 0,01 à 0,1 mm/an).

## 5.2

## Propagation instable des fissures

Le rapport de la contrainte de cisaillement active permanente sur la résistance instantanée du pont rocheux (charge de fluage) est donné par l'équation :

$$\sigma/\sigma_i = W \sin \alpha / (W \cos \alpha \tan \Phi + c_i S) \quad (6)$$

Comme précédemment, la cohésion instantanée, partiellement mobilisée lorsque l'accélération  $kg$  s'est produite, est déterminée par défaut à partir de l'inégalité (5), la surface  $S$  de ponts rocheux étant maintenant supposée constante au cours du temps. L'expression (6) donne donc une évaluation par excès du rapport  $\sigma/\sigma_i$ , qui peut être comparée aux lois empiriques obtenues à partir d'essais de fluage tertiaire (Fig. 7). Une analyse des résultats publiés dans la littérature a été effectuée par Amitrano et Helmstetter (2006). Ces auteurs ont montré que les données expérimentales peuvent être ajustées par une loi exponentielle (équation 7) ou par une loi puissance (8) :

$$t_f = t_0 \exp(-\alpha \sigma/\sigma_i) \quad (7)$$

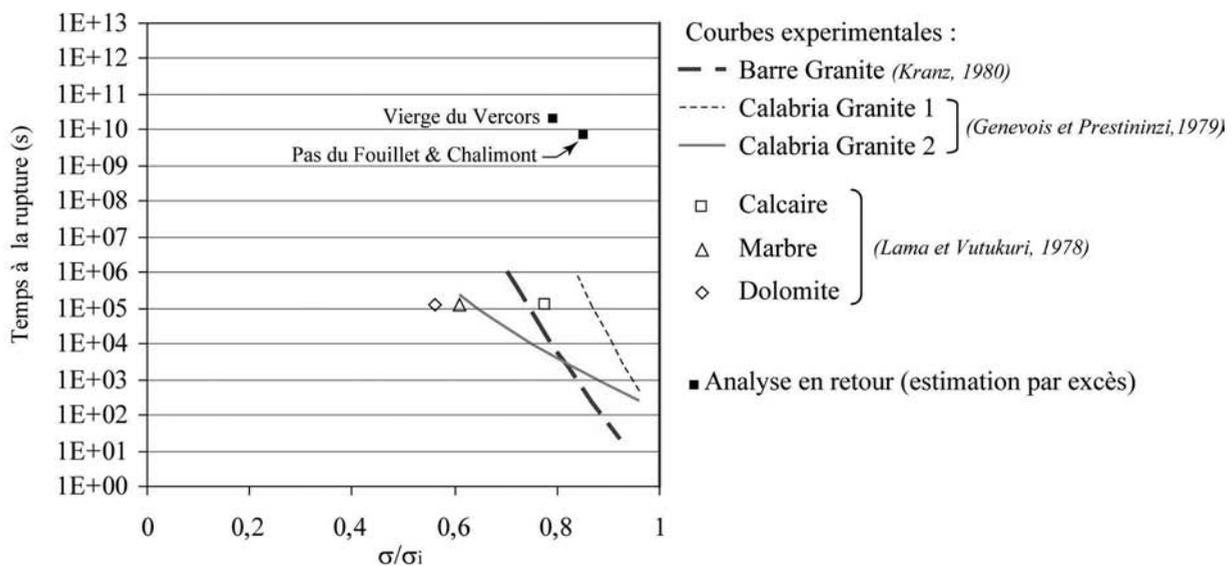
$$t_f = t_1 (\sigma/\sigma_i)^{-\beta} \quad (8)$$

Dans l'équation (8),  $t_1$  représente le temps avant la rupture instantanée. Pour situer nos résultats par rapport à ceux obtenus en laboratoire, nous avons considéré uniquement les essais en compression uniaxiale ou quasiment uniaxiale ( $\sigma_1 = 0,1 \text{ MPa}$ ), sur échantillons secs et à température ambiante. En effet, on peut esti-

**TABLEAU III** Principales données et résultats de l'analyse en retour de trois éboulements.

Main data and results of the back analysis of three rock falls.

Nom de l'éboulement	Virgée du Vercors	Chalimont	Pas du Fouillet
Volume (m <sup>3</sup> )	117	48	24
Cohésion (MPa)	4	10	6
Surface ponts rocheux à la rupture (m <sup>2</sup> )	0,6	0,1	0,08
Surface initiale de ponts rocheux (m <sup>2</sup> )	> 0,98	> 0,14	> 0,11
Durée de vie du compartiment (ans)	948	272	272
Vitesse de dissolution (mm/an)	> 0,05	> 0,07	> 0,07
Charge de fluage $\sigma/\sigma_i$	0,78	0,85	0,85



**FIG. 7** Temps à la rupture en fonction du rapport  $\sigma/\sigma_i$  de la contrainte active sur la résistance instantanée. L'analyse en retour (■) donne une estimation par excès de  $\sigma/\sigma_i$ .  
Time to failure as a function of the ratio  $\sigma/\sigma_i$  (acting stress/instantaneous strength). Back analysis (■) gives a maximal value of  $\sigma/\sigma_i$ .

mer que, dans les cas de rupture analysés, la contrainte principale mineure est toujours très faible ou négative. On peut estimer également que la roche constituant les ponts rocheux dans les falaises calcaires étudiées n'est, la plupart du temps, pas saturée. Sur la figure 7, sont représentées les lois puissance obtenues à partir d'essais effectués sur des granites par Kranz (1980) et Genevois et Prestinzi (1979). Les paramètres correspondants varient entre 0,85 et 142 pour  $t_1$ , et entre 15 et 56 pour  $\beta$  (Frayssines, 2005). A partir d'un point obtenu par analyse en retour, il est possible d'estimer par excès le paramètre  $\beta$ , en considérant que  $t_1$ , le temps nécessaire pour obtenir la rupture lors d'un essai classique de laboratoire, est de l'ordre de 1 à 100 secondes. L'estimation de  $\beta$  par excès, obtenue à partir de l'éboulement de la Vierge du Vercors, est ainsi de 79 (pour  $t_1 = 100$  s) à 97 (pour  $t_1 = 1$  s). Notons qu'Amitrano et Helmstetter (2006) ont obtenu une valeur de  $\beta$  de 72 en compression uniaxiale et des valeurs allant jusqu'à 123 en compression triaxiale. On peut donc considérer que les valeurs par excès données par l'analyse en retour historique ne sont pas incompatibles avec celles déduites des essais en laboratoire, compte tenu de la dispersion importante de celles-ci.

La discordance importante entre les points de la figure 7 obtenus par analyse en retour et les lois ajustées sur les résultats de laboratoire peut s'expliquer par le fait que le rapport  $\sigma/\sigma_i$  a été surestimé, l'accélération sismique présumée étant nettement insuffisante pour mettre en évidence la véritable valeur de la cohésion instantanée. Cette discordance peut aussi être accentuée par le fait que les essais de laboratoire ont été effectués sur du granite et non sur du calcaire. Or le calcaire peut se déformer par dissolution-cristallisation, comme le montrent la schistosité et les stylolites. Ce processus, concurrent de la microfissuration, pourrait expliquer qu'une charge de fluage plus importante soit nécessaire pour obtenir la rupture du calcaire.

Néanmoins, les valeurs des paramètres de fluage que nous avons obtenues, permettent d'estimer par

excès la durée de vie de compartiments rocheux sur une gamme de temps de l'ordre du millier d'années, beaucoup plus grande que celle investiguée par les essais de laboratoire. Dans le contexte du dimensionnement d'un ouvrage, une telle estimation n'est pas conservatrice et ne permet donc pas de garantir la sécurité. Mais dans celui de l'évaluation de l'aléa, elle permettrait de quantifier le délai dans lequel un éboulement peut être qualifié de très probable. Si ce délai est de l'ordre du siècle, l'aléa d'éboulement peut être qualifié de très élevé, ce qui peut justifier des travaux de sécurisation ou une interdiction de construire.

## 6

### Conclusion

L'analyse en retour de la rupture, sur trois cas d'éboulement, a permis d'estimer la cohésion « en vraie grandeur » du calcaire urgonien, qui est en moyenne 3 fois plus faible que celle obtenue en laboratoire.

L'analyse en retour « historique » a permis d'appréhender quantitativement le problème de l'évolution temporelle de la stabilité. L'hypothèse d'une dégradation par dissolution du calcaire est compatible avec les vitesses données dans la littérature. L'hypothèse d'une propagation instable de la fissuration est compatible avec les données expérimentales et les complète en explorant un domaine temporel plus étendu (le millier d'années). La loi obtenue à partir des analyses en retour historiques permet d'estimer par excès, la durée de vie de compartiments rocheux sur une gamme de temps de l'ordre du millier d'années, beaucoup plus grande que celle investiguée par les essais de laboratoire. Une telle estimation par excès ne permet pas de garantir la sécurité d'un ouvrage, mais elle permettrait, dans certains cas, de justifier des travaux de sécurisation ou une interdiction de construire. Une meilleure connaissance du comportement des roches en fluage tertiaire est nécessaire pour améliorer cette estimation.

Il convient cependant de rappeler qu'une analyse géomécanique prenant en compte les ponts rocheux n'est possible que lorsque ceux-ci sont connus, ce qui est rarement le cas. Cette considération souligne les limites actuelles de l'approche géomécanique dans l'évaluation de l'aléa (Hantz, 2001) et la nécessité de poursuivre les recherches sur l'application des méthodes de prospection géophysique à la reconnaissance des parois rocheuses. Des premiers résultats intéressants ont été obtenus en utilisant le géoradar

pour détecter des fractures ouvertes dans des falaises calcaires (Dussauge-Peisser *et al.*, 2003 ; Deparis *et al.*, à paraître).

#### REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les organismes qui ont contribué au financement de ces travaux : le département de l'Isère (Pôle grenoblois Risques naturels), la Région Rhône-Alpes, l'Union européenne (projets InterregIIIA « Rockslidetec » et InterregIIIB « ClimChAlp »).

## Bibliographie

- Amitrano D., Helmstetter A. – Brittle creep, damage and time to failure in rocks. *J. Geophys. Res.*, 111, B11201, doi: 10.1029/2005JB004252, 2006.
- Arnaud H. – Paleogeography of the Urgonian limestones of the Southern France. *Géobios*, Mémoire spécial 3, 1979, p. 363-383.
- Atkinson B.K. – Subcritical crack growth in geological materials. *J. Geophys. Res.*, 89, 1984, p. 4077-4114.
- Delannoy J.J. – Le Vercors : un massif de la moyenne montagne alpine. *Karstologia* 3, 1984, p. 34-35.
- Deparis J., Garambois S., Hantz D. (à paraître) – On the potential of Ground Penetrating Radar to help rock fall hazard assessment of a limestone scale. Accepté par *Engineering Geology*.
- 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, 2002, p. 15-26.
- Dussauge-Peisser C., Wathélet M., Jongmans D., Hantz D., Couturier B., Sintès M. – Investigation of a fractured limestone cliff (Chartreuse Massif, France) using seismic tomography and ground penetrating radar. *Near Surface Geophysics*, 2003, p. 161-170.
- Frayssines M. – *Contribution à l'évaluation de l'aléa éboulement rocheux*. Mémoire de thèse, UJF, 2005.
- Frayssines M., Hantz D. – Failure mechanisms and triggering factors in calcareous cliffs of the Subalpine Ranges (French Alps). *Engineering Geology*, 86, 2006, p. 256-270.
- Genevois R., Prestinini A. – Time-dependent behaviour of granitic Rocks related to their alteration grade. *Proc. 4th Congr. of the Int. Soc. for Rock Mechanics*, Montreux, 1979.
- GEO-TER – *Révision du zonage sismique de la France, étude probabiliste*. Rapport n° GTR/MATE/0701-150, 2002.
- Goodman R. – *Introduction to rock mechanics*. Wiley, 1989.
- Gunzburger Y., Merrien-Soukatchoff V., Guglielmi Y. – Influence of daily surface temperature fluctuations on rock slope stability: Case study of the Rochers de Valabres slope (France). *Int. Journ. of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 42 (3), 2005, p. 331-349.
- Hantz D. – Ingénierie des pentes rocheuses naturelles et artificielles. *Les Techniques de l'industrie minière*, n° 10, *Les progrès dans la maîtrise des mouvements de terrain*, 2001, p. 66-75.
- Hantz D., Dussauge-Peisser C., Jeannin M., Vengeon J.M. – Danger d'éboulements rocheux : de l'opinion d'expert à une évaluation quantitative. *Symp. Geomorphology: from expert opinion to modelling, Strasbourg*, 26-27/04/02, 2002, p. 115-122.
- Hantz D., Vengeon J.M., Dussauge-Peisser C. – An historical, geomechanical and probabilistic approach to rock-fall hazard assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, 2003, p. 693-701.
- Hantz D., Frayssines M. – The relation between rock fall frequency and erosion rate. *Geophysical Research Abstracts*, vol. 7, 04112, 2005.
- Hoek E., Brown E.T. – *Underground Excavations in Rock*. The Institution of Mining and Metallurgy, Londres, 1980.
- Hungr O., Evans S. G., Hazzard J. – Magnitude and frequency of rock falls along the main transportation corridors of southwestern British Columbia. *Canadian Geotechnical Journal*, 36, 1999, p. 224-238, 1999.
- Kemeny J. – The time-dependent reduction of sliding cohesion due to rock bridges along discontinuities: a fracture mechanics approach. *Rock Mech. Rock Engin.* 36 (1), 2003, p. 27-38.
- Kranz R. – The effect of confining pressure and difference stress on static fatigue of granite. *J. Geophys. Res.*, 85, 1980, p. 1854-1866.
- Kupper M. – *Les vitesses d'érosion du calcaire. Étude de processus actuels sous différents climats*. Thèse, Liège, 1981.
- Lama R.D., Vutukuri V.S. – *Handbook on Mechanical Properties of Rocks, Testing Techniques and Results*. Ed. Trans Tech Publications, 1978.
- Rovera G. – L'ébouilisation des corniches de calcaire urgonien dans le massif de la Grande Chartreuse. *Environnements périglaciaires*, XXII-4, 1997, p. 13-27.
- RTM – *Inventaire des mouvements rocheux, Secteur de l'Y grenoblois*. Rapport du Service de restauration des terrains en montagne de l'Isère, Grenoble, France, 1996.
- Siame L.L., Braucher R., Bourlès D.L. – Les nucléides Cosmogéniques cosmogéniques produits *in situ* : de nouveaux outils en géomorphologie quantitative. *Bulletin de la Société Géologique géologique de France*, 171 (4), 2000, p. 383-396.
- Vengeon J.M., Hantz D., Dussauge C. – Prédicibilité des éboulements rocheux : approche probabiliste par combinaison d'études historiques et géomécaniques. *Revue française de géotechnique*, n° 95/96, 2001, p. 143-154.
- Wieczorek G.F., Snyder J.B., Alger C.S., Isaacson K.A. – *Yosemite historical rockfall inventory*. US Geol. Surv. Open File Report, 92-387, 38, 1992.