

Prévisibilité des éboulements rocheux Approche probabiliste par combinaison d'études historiques et géomécaniques

J.-M. VENGEON
D. HANTZ
C. DUSSAUGE

Lirigm/ISTG, Université
Joseph-Fourier
BP 53
38041 Grenoble Cedex 9
Jean-Marc.Vengeon@ujf-
grenoble.fr
Didier.Hantz@ujf-
grenoble.fr
Carine.Dussauge@ujf-gre-
noble.fr

Résumé

La prévision d'une date d'éboulement est parfois possible pour des sites instrumentés en mouvement, mais pas pour la majorité des masses rocheuses naturelles potentiellement instables. Pour ces dernières, les méthodes mécaniques ne permettent généralement pas d'estimer quantitativement la probabilité que l'éboulement se produise dans un certain délai, principalement à cause de la méconnaissance de l'évolution temporelle des facteurs influençant la stabilité (facteurs dégradants ou déclenchants).

Pourtant, la prise en compte de l'aléa « éboulement » dans les études d'aménagement du territoire incite à quantifier les probabilités d'occurrence associées à différents délais, à l'instar d'autres aléas naturels récurrents tels que les séismes ou les crues. Le caractère récurrent des éboulements est discutable, mais des études récentes montrent que l'analyse statistique des éboulements connus historiquement permet, dans certaines conditions, d'estimer la probabilité qu'un éboulement d'une classe de volume donnée se produise dans une zone pour laquelle existe un inventaire d'éboulements rocheux.

Associant cette estimation prospective de l'activité d'éboulement sur la zone d'étude à une hiérarchisation en terme de danger des masses rocheuses potentiellement instables, détectées et caractérisées par une approche géomécanique, la méthode HGP (historique, géomécanique et probabiliste) constitue un premier pas vers l'évaluation de la probabilité d'éboulement des instabilités détectées en fonction du temps. Des exemples d'études historiques et géomécaniques sont présentés et la nature des probabilités calculées est discutée.

Mots-clés : éboulements, probabilité, prévision, étude historique, statistiques, étude géomécanique, stabilité.

Rock fall forecast A probabilistic approach combining historical and geomechanical studies

Abstract

Forecasting the date of a rock fall is sometimes possible in the case of monitored moving rock masses. But for most potentially unstable slopes, mechanical methods generally fail to estimate their probability of rupture as a function of time. This limitation arises mainly from ignorance of the temporal evolution of the factors which determine the stability.

Introduction

La gestion rationnelle des territoires exposés aux divers risques naturels exige une quantification de ces risques, qui sont le produit des conséquences d'un phénomène (aléa) par sa probabilité d'occurrence pour le délai considéré. Dans le cas du risque induit par les éboulements, l'aléa se divise en deux parties indépendantes : le déclenchement de l'éboulement par rupture du compartiment rocheux instable et la propagation dans le versant sous-jacent de la masse rocheuse libérée, éventuellement fragmentée. L'étude de la propagation des blocs en mode indépendant est aujourd'hui bien développée (Descoedres et Zimmermann, 1987 ; Rochet, 1987) et de nombreux codes de calcul sont couramment utilisés par les bureaux d'études. Le cas des avalanches rocheuses fait encore l'objet de recherches.

En revanche, le phénomène initial de déclenchement de l'éboulement est beaucoup moins bien quantifié. Les seuls cas où un haut niveau de prédictibilité a pu être atteint sont ceux de sites comme la route du littoral à la Réunion (AIGL, 2000) affectés de chutes de pierres très répétitives (prédiction en terme de fréquence moyenne) et de certains sites surveillés, où les mesures de déplacement ont permis de réaliser des prévisions à court terme du comportement (Azimi et Desvarreux, 1996 ; Glaw et Lotter, 1996). Dans la majorité des cas, concernant des masses rocheuses potentiellement instables non surveillées (appelées par la suite « instabilités potentielles »), la quantification de la probabilité de rupture en fonction du temps est extrêmement difficile et peu codifiée. La plupart du temps, l'estimation des couples délai/probabilité, demandés par le donneur d'ordre, est réalisée par le chargé d'étude sous la forme d'un jugement « à dire d'expert », dont la méthodologie a été bien précisée (mode d'observation, traçabilité des informations...) mais qui reste un processus subjectif (Interreg2c).

Les approches quantitatives de l'évaluation temporelle de la probabilité d'éboulement pour des masses rocheuses potentiellement instables peuvent être de deux natures. L'approche la plus fréquemment employée est la modélisation mécanique de la masse rocheuse considérée (Cherubini *et al.*, 1992) qui en pratique ne permet pas de prendre en compte correctement son évolution temporelle, pour des raisons que nous exposerons brièvement. La nouvelle approche

Nevertheless, natural risk management for land use demands an attempt to quantify rock fall hazards like other natural hazards (earthquakes, floods...), for which the probability of occurrence of given intensity as a function of time is estimated. Recent studies show that statistical analysis of historical rock falls permits, under certain conditions, an estimation of the probability of occurrence of a rock fall in a given volume class, during a given period.

The HGP method (Historical, Geomechanical and Probabilistic) associates this estimation of the future rock fall activity on the study zone with a hazard grading of detected potentially unstable rock masses. It is a first step toward the evaluation of the individual probability of rupture of a specific instability, as a function of time. Examples of historical and geomechanical studies are presented and the meaning of the computed probabilities is discussed in terms of a fictitious example.

Key words : rock fall, probability, forecast, historical study, statistics, geomechanical study, stability.

Présentation générale de la méthode HGP (historique, géomécanique et probabiliste)

Nécessité d'une nouvelle méthode de quantification de la probabilité d'éboulement en fonction du délai

Pour l'approche par modélisation mécanique de la stabilité des massifs rocheux, les insuffisances d'un traitement déterministe ont bien été mises en évidence (Scavia, 1988) et ont poussé au développement de méthodes mécaniques probabilistes, conçues pour prendre en compte l'incertitude sur les données du problème (géométrie et caractéristiques mécaniques). Ce type d'étude doit commencer par un « calage » des plages de variation des paramètres du système pour tenir compte de la stabilité connue (actuelle et passée) de la masse rocheuse pour des sollicitations courantes. La seconde phase, pronostique, consiste à calculer avec le même modèle mécanique les distributions du facteur de sécurité (F) obtenues en supposant des sollicitations plus importantes (facteurs déclenchants : pressions hydrauliques, accélérations sismiques...) ou en supposant une évolution de certains paramètres mécaniques (diminution de la cohésion, modification de la morphologie...). Pour chaque scénario « paramétrique », le calcul fournit une distribution de probabilité pour le facteur de sécurité F. L'aire située sous la courbe de la distribution pour des valeurs de $F < 1$ est interprétée

comme la probabilité de rupture conditionnelle associée au scénario considéré.

La méthode est en théorie parfaitement justifiée, mais dans le cas des pentes naturelles, ce sont les données pertinentes qui font en général défaut pour associer un délai aux probabilités de rupture calculées, puisqu'il est généralement impossible de connaître avec précision les probabilités d'occurrence des scénarios paramétriques considérés. Notamment, les mesures permettant de justifier le passage de données sismiques régionales à des accélérations locales en tête de falaise sont très rarement effectuées. Par ailleurs, la pression hydraulique dans les fractures d'un massif rocheux n'est pas accessible aujourd'hui de manière réaliste à partir de la connaissance de la pluviométrie. Quant à la décroissance des caractéristiques mécaniques, sa mesure se heurte au problème du contraste des échelles de temps humaines et géologiques.

Toutes ces difficultés pratiques à introduire une dimension temporelle pertinente dans l'analyse mécanique de la stabilité nous ont poussés à rechercher une méthode permettant la prise en compte empirique des caractéristiques temporelles du phénomène, à partir des inventaires d'éboulements connus.

2.2

Principe de la méthode

Nous proposons de « caler » l'estimation des probabilités de rupture des instabilités potentielles sur la dynamique locale du phénomène « éboulement », dans les domaines temporel et spatial. Dans ce but, nous proposons de travailler sur une zone d'étude élargie, d'une échelle spatiale supérieure de plusieurs ordres de grandeurs à celle du compartiment rocheux isolé, et de croiser deux types d'informations :

- les taux d'éboulement attendus sur la zone d'étude, pour des classes de volumes définies ;
- la détection-hiérarchisation des aléas sur cette zone.

Pour chaque classe de volume, la fréquence moyenne d'éboulement (nombre moyen d'événements par siècle ou par an), est estimée par une étude historique et statistique sur la zone d'étude considérée ou sur une zone plus étendue. Les modalités, les hypothèses et les difficultés de cette estimation sont exposées au paragraphe suivant, illustrées par l'exemple des falaises calcaires de l'agglomération grenobloise (appelée aussi « Y » grenoblois, car le carrefour des vallées de l'Isère et du Drac est en forme de Y).

Cette « fréquence globale pour une classe de volume » est ensuite répartie de manière inégale entre les différentes instabilités potentielles de cette classe de volume qui ont été détectées et hiérarchisées lors de l'étude géomécanique. Les méthodes de détection-caractérisation utilisées et les développements envisagés pour la hiérarchisation des instabilités potentielles détectées sont exposées au paragraphe 4.

La répartition de la fréquence globale de la zone entre les différentes instabilités potentielles, pondérée selon leur hiérarchie de « danger », permet d'affecter une « fréquence moyenne de rupture » (au sens statistique) à chacune. On peut ainsi déterminer une « période de retour » qui a en fait la signification d'une

« espérance de vie » car chaque éboulement ne se produit à l'identique qu'une seule fois. En faisant l'hypothèse d'une distribution de Poisson, on peut déduire de cette « période de retour » une courbe de probabilité locale d'éboulement en fonction du temps, à partir de laquelle pourront être extraits tous les couples (délai-probabilité) souhaités.

Un exemple fictif de ce « croisement d'informations » est traité au paragraphe 5. La nature de la prévision ainsi réalisée est discutée, soulignant l'importance de sa dépendance vis-à-vis de la pondération en risques relatifs adoptée pour les classes d'aléa et de sa nécessaire évolution dans le temps, dès qu'une seule des hypothèses de calcul (taux d'éboulement, nombre et hiérarchie des instabilités potentielles) est modifiée.

3

Étude historique

3.1

Principe

L'étude historique a pour but d'estimer, sur une zone donnée, les fréquences moyennes d'éboulement correspondant à différentes classes de volume d'éboulement. Pour être représentative, cette estimation doit être faite à partir d'un nombre significatif d'événements de chaque classe. Les petits éboulements étant plus fréquents que les gros, les classes correspondant aux plus gros volumes nécessitent une observation sur des périodes plus longues ou des surfaces plus étendues. L'estimation peut être faite en utilisant directement les données historiques brutes, ou en s'appuyant sur une modélisation statistique de celles-ci.

3.1.1

Exemples de données historiques brutes

Pour les chutes de blocs, une estimation de la fréquence moyenne a pu être effectuée, sur un tronçon de 11 km de route littorale de l'île de la Réunion, à partir d'un inventaire portant sur quatre années (CFGI, 2000) : 423 chutes ont été recensées sur la période 1992-1995, ce qui donne une fréquence moyenne de 0,29 chute/jour.

Dans la classe de 100 à 1 000 m³, sur une centaine de km de falaises calcaires de la région grenobloise, de hauteur maximale 400 m, 32 éboulements ont été recensés au XX^e siècle (Dussauge, thèse en cours). Sur la même zone, dans la classe 1 à 10 hm³, trois éboulements seulement ont été recensés pour les quatre derniers siècles.

Pour des volumes plus importants, il faut considérer une zone beaucoup plus étendue pour avoir une idée de la fréquence moyenne d'éboulement : dans la classe 10 à 100 hm³, six événements sont recensés dans les Alpes au XX^e siècle ; dans la classe 100 à 1 000 hm³, trois sont recensés sur les neuf derniers siècles (Couture, 1998). Enfin, six éboulements post-glaciaires de volume supérieur à 1 000 hm³ sont connus dans les Alpes (Couture, 1998).

Modélisation statistique des données historiques

Comme le montrent les exemples précédents, à l'échelle d'une zone d'étude homogène de quelques km ou dizaines de km d'étendue, les éboulements sont relativement rares à partir d'un certain volume et l'on ne peut estimer leur fréquence que très grossièrement. Cependant, certains travaux récents suggèrent que les distributions des volumes d'éboulement suivent des lois relativement simples, qui permettraient d'améliorer l'estimation des fréquences d'éboulement.

Dussauge *et al.* (article soumis) ont analysé trois inventaires d'éboulements, couvrant une plage de volume de 1 à 10^{10} m^3 . Les auteurs ont montré que, malgré de nombreuses différences entre ces inventaires (exhaustivité, mode d'échantillonnage, mode d'estimation des volumes...), les distributions cumulées des volumes peuvent chaque fois être décrites par des lois puissance, avec un risque d'erreur inférieur à 10 % (test du χ^2). Le nombre N d'éboulements d'un volume supérieur à V peut donc s'écrire :

$$N = A V^{-b} \quad (1)$$

La valeur absolue b de l'exposant varie entre 0,4 et 0,5 suivant l'inventaire utilisé.

D'autres auteurs ont également obtenu des distributions de volumes d'éboulement rocheux en loi puissance, avec des exposants variant de 0,2 à 0,7 suivant la zone d'étude (Gardner, 1970 ; Noever, 1993 ; Hungr *et al.*, 1999). Ce type de loi est déjà utilisé pour décrire la dynamique de processus liés à la fracturation à différentes échelles, comme la sismicité (Grasso et Sornette, 1998), l'activité volcanique (Lahaie, 1998) ou l'émission acoustique (Amitrano *et al.*, 1999). Il est intéressant de noter que l'on observe ainsi une certaine continuité dans la description statistique des phénomènes d'endommagement et de fracturation depuis l'échelle microscopique jusqu'à celle de la croûte terrestre.

En admettant que la distribution des éboulements dans la zone d'étude obéisse à une loi puissance, un ajustement des données historiques à cette loi permet d'obtenir une meilleure estimation des fréquences d'éboulement pour chaque classe de volume. Pour la classe (V_i, V_{i+1}) , l'estimation du nombre moyen d'éboulements pour une durée T , égale à celle couverte par l'étude historique, est donnée par l'expression :

$$N_{ei} = A (V_i^{-b} - V_{i+1}^{-b}) \quad (2)$$

La fréquence moyenne estimée pour la classe de volume « i » est donc :

$$F_{ei} = N_{ei}/T \quad (3)$$

L'utilisation de cette fréquence pour une prévision probabiliste sur une période future nécessite l'hypothèse de stationnarité du processus d'évolution des falaises étudiées, sur la période couverte par l'étude historique et la prévision. On suppose en effet que la distribution des événements passés est représentative des événements à venir.

3.2

Application à l'étude historique de l'agglomération grenobloise

La méthode proposée a été appliquée pour estimer les fréquences moyennes d'éboulement dans les falaises du « Y » Grenoblois. La zone concernée par cette étude historique comprend une centaine de km de falaises dont la hauteur atteint par endroits 400 m. Ces falaises appartiennent aux massifs subalpins de la Chartreuse et du Vercors et sont constituées essentiellement par deux barres de calcaire séparées par des terrains marneux ou marno-calcaires. Le plus souvent,

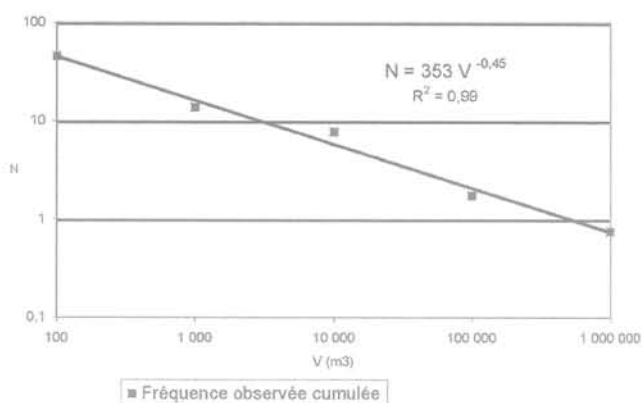


FIG. 1 Nombre d'éboulements par siècle de volume $\geq V$ (agglomération grenobloise). Rock fall number, per century, with volume $\geq V$ (Grenoble District).

TABLEAU I Fréquences d'éboulement observées et estimées sur l'Agglomération Grenobloise. Observed and estimated rock fall frequencies for Grenoble District.

Volume (m^3)	$< 10 \text{ m}^3$	10 à 100	100 à 1 000	1 000 à 10 000	10 000 à 100 000	100 000 à 1 000 000	1 hm^3 à 10 hm^3
XX ^e siècle	25	22	32	6	6	0	1
XIX ^e siècle		4			1	2	1
XVIII ^e siècle		1		1	1		0
XVII ^e siècle			1				1
Fréquence observée par classe			32	6	6	1	0,75
Fréquence observée cumulée			45,75	13,75	7,75	1,75	0,75
Fréquence moyenne estimée/classe			28,9	10,4	3,7	1,3	0,5

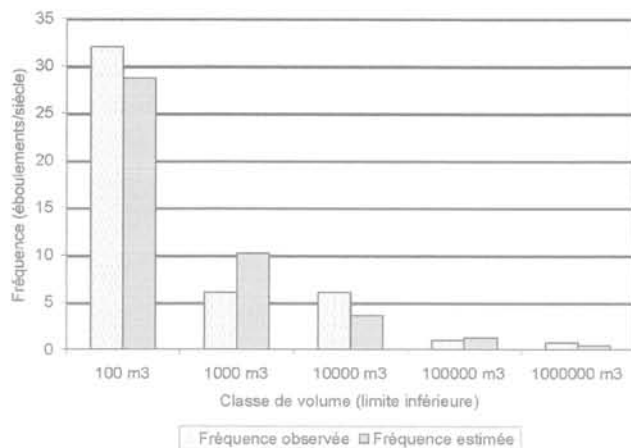


FIG. 2 Fréquences d'éboulements observées et calculées (agglomération grenobloise).
Observed and estimated rock fall frequencies (Grenoble District).

les bancs sont subhorizontaux et la pente des falaises subverticale.

Un inventaire des éboulements survenus dans l'agglomération a été constitué par le service de Restauration des terrains en montagne de l'Isère (RTM, 1996). Il comporte 105 éboulements répartis sur les quatre derniers siècles (tableau I). Les données concernant les XVII^e, XVIII^e et XIX^e siècles sont, à l'évidence, très fragmentaires, sauf pour les deux classes de volume les plus élevées (0,1 à 10 hm³), pour lesquelles les éboulements ont laissé des traces visibles pendant plusieurs siècles. Pour le XX^e siècle, les volumes inférieurs à 100 m³ sont manifestement sous-représentés (il y en a moins dans la classe 10-100 m³ que dans la classe 100-1 000 m³) ; ils n'ont donc pas été pris en compte.

D'autre part, pour les deux classes les plus élevées, une période d'un siècle apparaît trop courte pour estimer, même grossièrement, des fréquences d'éboulement. Il apparaît donc que la période d'étude doit être d'autant plus longue que le volume considéré est

important. C'est pourquoi nous avons calculé la fréquence sur les deux derniers siècles pour la classe 0,1 à 1 hm³ et sur les 4 derniers pour la classe 1 à 10 hm³. Les données considérées comme significatives apparaissent en grisé sur le tableau I, ainsi que les fréquences correspondantes pour chacune des classes de volume (fréquences « observées ») et les fréquences cumulées.

La fréquence cumulée F_c (en nombre par siècle) des éboulements d'un volume supérieur à V (exprimé en m³) a été modélisée par une loi puissance définie par la relation :

$$F_c = 353 V^{-0,45} \quad (4)$$

La droite de régression en coordonnées logarithmiques est représentée sur la figure 1. L'histogramme de la figure 2 représente les fréquences observées sur les périodes d'étude et les fréquences moyennes estimées à partir de la loi puissance.

En admettant que les compartiments rocheux susceptibles de s'ébouler sont nombreux, si leurs probabilités d'éboulement étaient égales, le nombre d'éboulements se produisant en un siècle dans une classe de volume donnée suivrait une loi de Poisson dont la moyenne f serait une des fréquences estimées précédemment. La probabilité que le nombre d'événements N soit égal à n serait alors :

$$P(N = n) = e^{-f} f^n / n! \quad (5)$$

A titre d'exemple, la distribution de probabilité obtenue pour la classe 10 000-100 000 m³, dont la fréquence moyenne est d'environ quatre événements par siècle, est représentée sur la figure 3, ainsi que la probabilité qu'il se produise n éboulements ou plus. La probabilité qu'il se produise plus de sept éboulements est inférieure à 10 % et celle qu'il s'en produise plus de neuf inférieure à 1 %.

4

Étude géomécanique

L'application de la méthode HGP suppose la détection et la hiérarchisation des instabilités potentielles présentes sur la zone couverte par l'inventaire des éboulements connus. De telles études sont pour l'instant rares et souvent liées à des itinéraires routiers ou ferroviaires. Elles devraient cependant se multiplier avec la prise en compte croissante des contraintes d'aménagement à l'échelle intercommunale, comme le montre l'exemple cité au paragraphe 4.1.2.

4.1

Détection et caractérisation des instabilités potentielles

4.1.1

Données utiles à la détection des instabilités potentielles

La détection et la caractérisation des instabilités potentielles sur une zone, en vue de leur hiérarchisa-

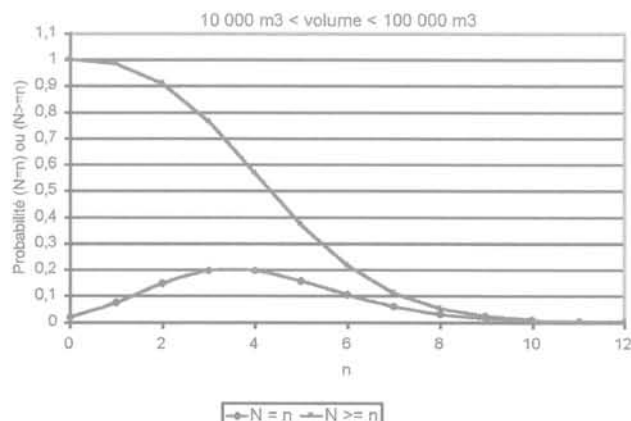


FIG. 3 Probabilité d'observer n ou plus de n éboulements pour une fréquence moyenne de 4 éboulements par siècle (cas de la classe 10⁴-10⁵ m³ dans l'agglomération grenobloise).
Probability for n or more than n rock falls with a mean frequency of 4 rock falls per century (case of the 10⁴-10⁵ m³ volume class in the Grenoble District).

tion, se fondent sur l'observation de différents types de données :

– la morphologie locale de la falaise (pente, éperons et dièdres ou couloirs, microreliefs...) ;

Les données géomécaniques, principalement le découpage structural (qui détermine les mécanismes possibles) et les résistances mécaniques de la roche et des discontinuités ;

– les signes d'activité, tels que les indices de mouvement actif (ouverture de fractures, chutes de blocs...), ou les indices de rupture régressive ;

– les données environnementales qui peuvent traduire les sollicitations « extérieures », telles que les possibles pressions hydrauliques, les accélérations sismiques, les cycles de gel-dégel...

4.1.2

Exemple de l'étude de risque d'éboulement majeur sur l'« Y » grenoblois

Les 140 km de falaises calcaires de l'agglomération grenobloise sont un bon exemple de zone sur laquelle seront bientôt disponibles des études géomécaniques et historiques d'éboulement. En effet, en complément de l'étude historique évoquée au paragraphe 3.2, une étude originale est en cours pour qualifier les aléas d'éboulements majeurs (de l'ordre de 10^5 m³ et plus) sur l'« Y » grenoblois, dans le cadre d'une étude prospective d'aménagement du territoire. Après une phase de test, le groupement en charge de l'étude (Association pour le développement de la recherche sur les glissements de terrain, Centre d'études techniques de l'équipement de Lyon et Laboratoire interdisciplinaire de recherche impliquant la géologie et la mécanique de l'université Joseph-Fourier, Grenoble) a adopté une méthodologie permettant de réaliser l'étude dans le temps disponible tout en assurant une certaine homogénéité du niveau d'exhaustivité entre les différentes zones et les différentes équipes ainsi que la traçabilité des informations.

Cette méthode s'appuie principalement, après l'examen des documents existants (cartes géologiques, rapports d'étude antérieurs, photographies aériennes à axe vertical...), sur une couverture photographique spécifique des falaises par des clichés à axe oblique et grande échelle (1/3 000 environ) pris d'hélicoptère. Un cahier des charges strict assure une vision stéréoscopique et une bonne observation du découpage structural quelle que soit la morphologie locale. Ces clichés de détail sont rattachés à une couverture photographique à axe horizontal et perpendiculaire à la paroi d'échelle approximative 1/6 000, qui permet d'estimer correctement les dimensions des structures observées. Ces observations sont ensuite contrôlées et complétées par des visites de terrain, se déroulant sur un faible nombre de jours au regard des zones couvertes.

Les instabilités potentielles détectées seront classées dans trois grandes catégories :

– les aléas qualifiés, qui doivent être pris en compte au vu des informations collectées ;

– les aléas à qualifier, qui nécessitent des investigations supplémentaires ;

– les aléas non qualifiés, dont on peut ne pas tenir compte à une échelle de temps humaine au vu des informations collectées.

4.2

Hierarchisation des instabilités potentielles détectées

4.2.1

Pratique actuelle : hiérarchisation par classes

La pratique actuelle consiste à regrouper les instabilités détectées au sein de classes de « même niveau de danger », par exemple fort, moyen et faible dans le cas d'une hiérarchie à trois classes. C'est le point crucial de ces études car il n'existe pas à l'heure actuelle de méthodologie explicite pour guider le chargé d'étude dans sa pondération des différentes informations collectées. Cette hiérarchisation fait donc pour une bonne part appel à l'expérience, sous la forme du « dire d'expert ». Elle reste généralement qualitative faute d'éléments permettant d'établir une quantification du « danger » associé à chaque classe ou faute de pouvoir justifier l'appartenance d'une instabilité potentielle donnée à une classe de danger quantifié.

4.2.2

Vers une hiérarchisation quantifiée

Un moyen de quantifier la hiérarchisation des instabilités potentielles détectées serait de mener sur les éboulements connus une étude statistique portant sur la présence ou non des « facteurs de risque » communément évoqués, analogue à celles menées en épidémiologie dans le domaine médical. Le résultat d'une telle étude serait une liste de facteurs de risque jugés statistiquement significatifs et dont le « poids » serait quantifié. A partir de là, l'examen de la présence ou de l'absence de ces différents facteurs sur chaque instabilité potentielle permettrait de calculer leur « risque relatif individuel ». Les instabilités potentielles seraient alors hiérarchisées directement, sans notion de classe, selon leur risque relatif individuel, qui est proportionnel à leur fréquence moyenne d'éboulement (voir l'exemple fictif traité au paragraphe 5).

Différentes méthodes, rétrospectives ou prospectives, existent pour mener à bien ce type d'étude, par rétro-analyse d'une banque de donnée spécialisée portant sur les éboulements réalisés (qu'il convient de constituer), ou par suivi d'une cohorte d'instabilités potentielles. Il est peu réaliste d'espérer mesurer le risque relatif associé à tous les paramètres pris en compte dans une étude géomécanique, mais cette démarche permettra de distinguer les facteurs dont l'influence est statistiquement quantifiable de ceux qui relèvent exclusivement du jugement de l'expert. Cette distinction sera évolutive, à mesure de la progression de l'étude en retour.

Enfin, pour faciliter la comparaison des instabilités potentielles, nous proposons une description par notation selon quatre rubriques. Cette démarche vise également à améliorer la reproductibilité d'une étude et la traçabilité des informations. Les notes obtenues pourront être testées comme « facteurs de risque » dans l'étude en retour mentionnée ci-dessus.

– « Statique » : la stabilité *statique* actuelle sous sollicitations courantes, d'après les observations structurales et géomécaniques réalisées.

– « Dynamique » : l'activité *dynamique* observée, sous forme de déplacements ou d'éboulements partiels (par exemple les chutes de blocs).

– « Aléatoire » : exposition et sensibilité aux facteurs déclenchants *aléatoires* (pluies, séismes) avec une intensité liée à une période de retour normalisée.

– « Continu » : exposition et sensibilité aux facteurs dégradants *continus* modifiant les contraintes (érosion, tectonique, déformations gravitaires...) ou réduisant la résistance (altération...).

Pour chaque rubrique, l'instabilité potentielle recevra une note de 1 à 10, associée à un indice de qualité (a, b, c) qui reflètera la qualité des données disponibles ou leur difficulté d'interprétation. On aboutira alors à une caractérisation synthétique des instabilités potentielles sous la forme suivante (par exemple) : S7a D9a A4b C5c. La grille de caractérisation qui précisera la façon de déterminer chaque indice pour les différents mécanismes d'instabilité est en cours de mise au point dans le cadre d'un projet européen (Interreg 2c, 2001) dont les travaux seront publiés à l'automne 2001.

5

Détermination des probabilités d'éboulement en fonction du temps

5.1

Exemple fictif

Afin d'envisager l'application de la méthode jusque dans ses dernières conséquences en nous affranchissant des contraintes de discrétion sur les études réelles en cours, nous allons traiter un exemple fictif. Supposons que nous ayons pu mener sur une zone des études historiques et géomécaniques telles que décrites ci-dessus. Nous aurions alors, pour la classe de volume « i » ($V_{i-1} < V < V_i$) :

– une fréquence globale moyenne FG_i , qui traduit le nombre moyen d'éboulements de cette ampleur attendus sur la zone par unité de temps, par exemple $FG_i = 4$ par siècle ;

– un groupe d'instabilités potentielles au nombre de $K_i = 58$, hiérarchisées de la manière suivante en trois classes ($j = 3$) de risque relatif R_j homogène (tableau II) : 2 aléas forts, 16 aléas moyens et 40 aléas faibles. Ces risques relatifs R_j quantifient les différences de niveau de danger entre les différentes classes et sont un des points clés de la méthode proposée. Leur utilisation est illustrée au paragraphe 5.2, leur influence est discutée au paragraphe 5.3 et leur détermination par une étude statistique est évoquée au paragraphe 5.4.

5.2

Détermination des courbes de probabilité d'éboulement en fonction du temps

Notre hypothèse de départ est que, à l'échelle de temps humaine, la probabilité de réalisation d'un éboulement dans une zone non détectée lors de l'étude géomécanique est négligeable devant les probabilités d'éboulement des instabilités potentielles détectées.

De ce fait, le « partage » de la fréquence globale FG_i se fait entre les K_i instabilités potentielles détectées de la classe de volume « i », au prorata des risques relatifs R_j affectés à chaque classe « j » de la hiérarchie. Les fréquences moyennes individuelles sont donc calculées selon la formule :

$$F_{ij} = FG_i \cdot (R_j / \sum_j (K_{ij} \cdot R_j)) \quad (6)$$

On vérifie dans la ligne « Total » que la somme des fréquences moyennes individuelles est bien égale à la fréquence globale moyenne :

$$\sum_j (K_{ij} \cdot F_{ij}) = FG_i \cdot \sum_j (F_{ij} \cdot R_j) / \sum_j (F_{ij} \cdot R_j) = FG_i \quad (7)$$

TABEAU II Fréquences individuelles et périodes de retour de la classe de volume « i », avec une pondération 1, 10, 100 pour les trois classes hiérarchiques « j » de l'exemple fictif.

Mean individual frequencies and return periods for the « i » volume class, determined with a 1, 10, 100 hazard weighting for the « j » hierarchical classes of the fictitious example.

Classe : j	Risque relatif : R_j	Effectif : K_{ij}	Contribution de la classe j ($K_{ij} \cdot R_j$)	Fréquences instantanées individuelles F_{ij} et périodes de retour T_{ij}
1 (fort)	$R_1 = 100$	$K_{i1} = 2$	$K_{i1} \cdot R_1 = 200$	$F_{i1} = FG_i \cdot R_1 / \sum_j (K_{ij} \cdot R_j)$ $F_{i1} = 4 \cdot 100 / 400$ $F_{i1} = 1/\text{siècle}$ $T_{i1} = 1 \text{ siècle}$
2 (moyen)	$R_2 = 10$	$K_{i2} = 16$	$K_{i2} \cdot R_2 = 160$	$F_{i2} = FG_i \cdot R_2 / \sum_j (K_{ij} \cdot R_j)$ $F_{i2} = 4 \cdot 10 / 400$ $F_{i2} = 0,1/\text{siècle}$ $T_{i2} = 10 \text{ siècles}$
3 (faible)	$R_3 = 1$	$K_{i3} = 40$	$K_{i3} \cdot R_3 = 40$	$F_{i3} = FG_i \cdot R_3 / \sum_j (K_{ij} \cdot R_j)$ $F_{i3} = 4 \cdot 1 / 400$ $F_{i3} = 0,01/\text{siècle}$ $T_{i3} = 100 \text{ siècles}$
Total	–	$\sum_j K_{ij} = K_i = 58$	$\sum_j (K_{ij} \cdot F_{ij}) = 400$	$\sum_j (K_{ij} \cdot F_{ij}) = 2 \cdot 1 + 16 \cdot 0,1 + 40 \cdot 0,01 = 4$ par siècle = FG_i

Une fois déterminée la fréquence moyenne individuelle d'un membre de la classe « j », on en déduit sa pseudo-période de retour (Fig. 4) :

$$T_{ij} = 1/F_{ij} \quad (8)$$

En supposant, comme pour les séismes, que le processus d'occurrence stochastique des éboulements est stationnaire et défini par cette pseudo-période de retour, et en faisant l'hypothèse que la distribution de Poisson décrit correctement ce processus, on obtient la courbe (probabilité individuelle/délai) caractéristique de chacune des classes hiérarchiques $j = 1, 2$ et 3 par l'équation 4 (Fig. 4). On pourra alors bâtir pour chaque

instabilité potentielle tous les couples (délai/probabilité) souhaités.

$$P_{ij}(t) = 1 - \exp(-t/T_{ij}) \quad (9)$$

La première application numérique (tableau II, Fig. 4) est réalisée en adoptant un ordre de grandeur de différence entre les risques relatifs associés aux trois classes hiérarchiques : $R_1 = 100$, $R_2 = 10$, $R_3 = 1$. On obtient respectivement une période de retour (ou « espérance de vie ») de 1, 10 et 100 siècles pour les trois classes de risque, qui correspondent respectivement à des probabilités d'éboulement de 39,5, 4,9 et 0,5 % dans un délai de 50 ans par exemple.

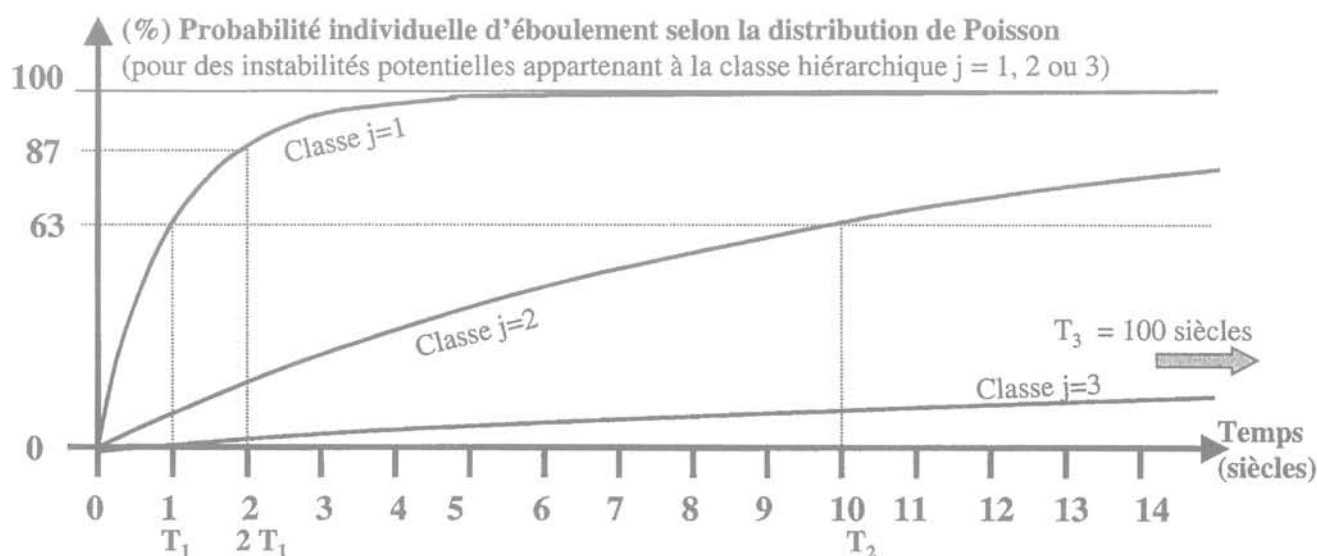


FIG. 4 Construction des courbes (probabilités/délais) pour les trois classes hiérarchiques « j » de la classe de volume « i » de l'exemple fictif.
Construction of the probability-versus-time curves for each « j » hierarchical class of the « i » volume class of the fictitious example.

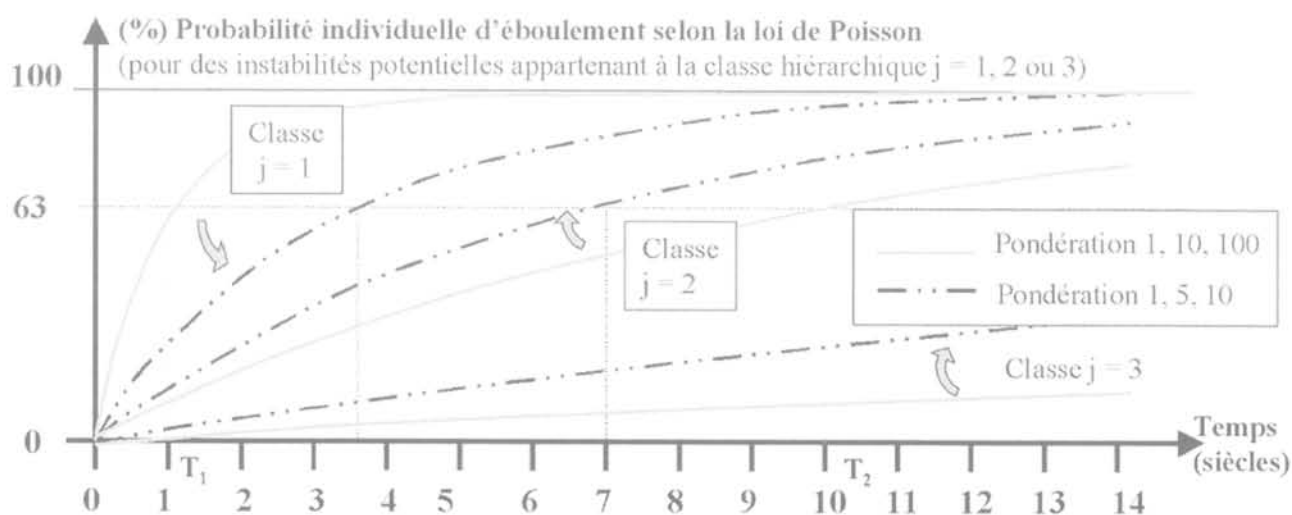


FIG. 5 Influence de la pondération choisie pour les classes hiérarchiques « j » sur les courbes probabilité/délai de la classe de volume « i ». Comparaison entre 1, 10, 100 et 1, 5, 10.
Influence of the hazard weighting chosen for « j » the hierarchical classes. Comparison between 1, 10, 100 and 1, 5, 10.

TABLEAU III

Fréquences individuelles et périodes de retour de la classe de volume « i », avec une pondération 1, 5, 10 pour les trois classes hiérarchiques « j ».

Mean individual frequencies and return periods for the « i » volume class, determined with a 1, 5, 10 hazard weighting for the « j » hierarchical classes of the fictious example.

Classe : j	Risque relatif : R_j	Effectif : K_j	Contribution de la classe j ($K_j \cdot R_j$)	Fréquences instantanées individuelles F_{ij}^* et périodes de retour T_{ij}^*
1 (fort)	$R_1^* = 10$	$K_1 = 2$	$K_1 \cdot R_1^* = 20$	$F_{11}^* = FG_1 \cdot R_1^* / \sum (K_j \cdot R_j^*)$ $F_{11}^* = 4.10/140$ $F_{11}^* = 0,286/\text{siècle}$ $T_{11}^* = 3,5 \text{ siècles}$
2 (moyen)	$R_2^* = 5$	$K_2 = 16$	$K_2 \cdot R_2^* = 80$	$F_{12}^* = FG_1 \cdot R_2^* / \sum (K_j \cdot R_j^*)$ $F_{12}^* = 4 \cdot 5/140$ $F_{12}^* = 0,143/\text{siècle}$ $T_{12}^* = 7 \text{ siècles}$
3 (faible)	$R_3^* = 1$	$K_3 = 40$	$K_3 \cdot R_3^* = 40$	$F_{13}^* = FG_1 \cdot R_3^* / \sum (K_j \cdot R_j^*)$ $F_{13}^* = 4 \cdot 1/140$ $F_{13}^* = 0,029/\text{siècle}$ $T_{13}^* = 35 \text{ siècles}$
Total	—	$\sum_j K_j = K_1 = 62$	$\sum_j (K_j \cdot R_j^*) = 140$	$\sum_j (K_j \cdot F_{ij}^*) = 2 \times 0,286 + 16 \times 0,143 + 40 \times 0,029 = 4 \text{ par siècle} = FG_1$

5.3

Influence de la pondération adoptée pour les classes hiérarchiques d'aléa

Le choix d'une pondération avec un ordre de grandeur d'écart entre les risques relatifs de deux classes hiérarchiques consécutives entraîne un ordre de grandeur d'écart entre les pseudo-périodes de retour des instabilités potentielles de ces classes, ce qui se traduit par des courbes probabilités/délais très espacées. L'exemple du tableau III et de la figure 5, montre qu'avec une pondération (1, 5, 10) des risques relatifs des trois classes hiérarchiques, les courbes de (probabilité/délai) sont beaucoup plus proches. Surtout, pour les instabilités potentielles de la classe $j = 1$ (« aléa fort »), la prévision pour un délai $\Delta t = 1$ siècle est totalement modifiée, puisqu'elle passe de 63 à 25 % de pro-

babilité de réalisation (selon la distribution de Poisson, pour $\Delta t = T$ et $\Delta t = T/3,5$).

L'influence de cette pondération arbitraire pourra à l'avenir être évitée si une étude statistique des facteurs de risque réussit à quantifier le risque relatif associé à différents facteurs et si la hiérarchisation est directement déduite du risque relatif total de chaque instabilité potentielle (voir paragraphe 5.2.2). C'est une condition nécessaire d'applicabilité de la méthode exposée, vu l'influence de la pondération hiérarchique sur les résultats.

5.4

Nature évolutive de la prévision

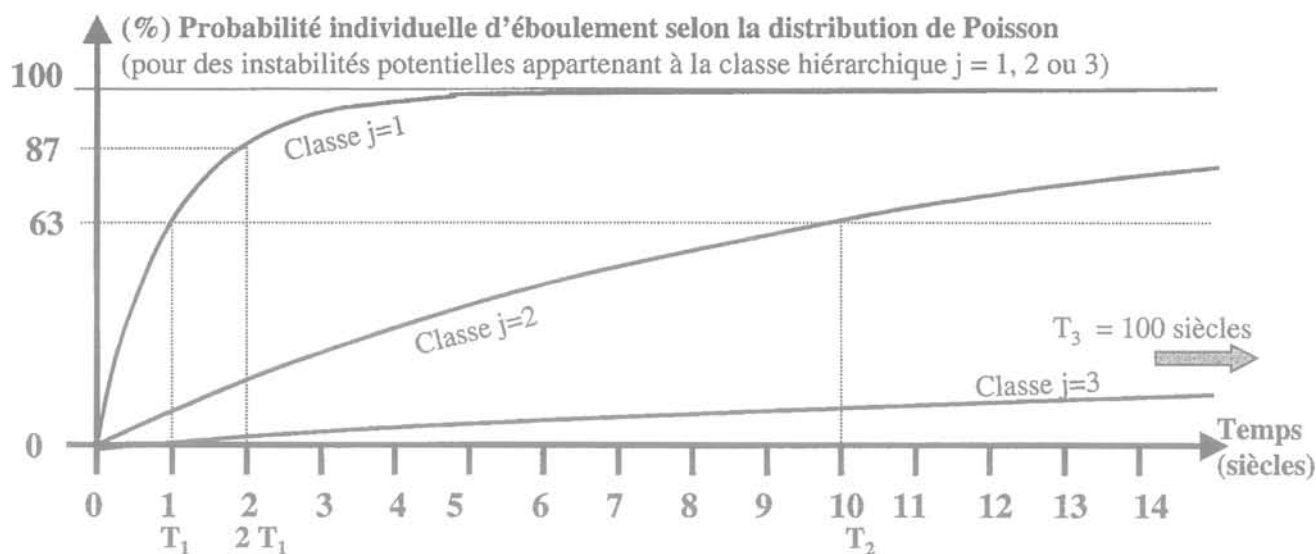
Si une instabilité potentielle s'éboule, en vertu de l'hypothèse de stabilité du taux d'éboulement, il faut

TABLEAU IV

Effectifs des classes hiérarchiques « j » dans la classe de volume « i » et nouvelles périodes de retour estimées en cas d'éboulement d'une seule (scénario Sc1) ou des deux (scénario Sc1*1) instabilités potentielles les plus dangereuses.

New return periods for the « i » volume class, determined with a 1, 10, 100 hazard weighting for the « j » hierarchical classes, if one (scenario Sc1) or two (scenario Sc1*1) of the two most dangerous potential instabilities of the fictious example have fell down.

Scénario	Classe j = 1		Classe j = 2		Classe j = 3	
	Eff.	Fréquence indiv. et période de retour	Eff.	Fréquence indiv. et période de retour	Eff.	Fréquence indiv. et période de retour
Initial	2	$F_{11} = FG_1/4$ = 1 par siècle $T_{11} = 100 \text{ ans}$	16	$F_{12} = FG_1/40$ = 0,1 par siècle $T_{12} = 1000 \text{ ans}$	10	$F_{13} = FG_1/400$ = 0,01 par siècle $T_{13} = 10000 \text{ ans}$
Sc 1	1	$(F_{11})' = FG_1/3$ = 4/3 par siècle $T_{11}' = 75 \text{ ans}$	16	$(F_{12})' = FG_1/30$ = 4/30 par siècle $T_{12}' = 750 \text{ ans}$	10	$(F_{13})' = FG_1/300$ = 4/300 par siècle $T_{13}' = 7500 \text{ ans}$
Sc 1*1	0	—	16	$(F_{12})'' = FG_1/20$ = 0,2 par siècle $T_{12}'' = 500 \text{ ans}$	10	$(F_{13})'' = FG_1/200$ = 0,02 par siècle $T_{13}'' = 5000 \text{ ans}$



ment d'une instabilité potentielle en fonction du délai. Elle nécessite la réalisation de deux études distinctes sur une large zone englobant l'instabilité locale étudiée : un inventaire d'éboulements historiques et une hiérarchisation des instabilités détectées dans chaque classe de volume.

La méthode HGP consiste à croiser ces deux types d'informations pour obtenir une estimation des périodes de retour des différentes instabilités potentielles détectées, et à en déduire, par l'hypothèse d'un processus Poissonien, leur courbe de probabilité d'éboulement en fonction du temps.

Il est intéressant de noter que si la méthode HGP paraît plus adaptée à la prise en compte de la dimension temporelle (dérivée de l'inventaire historique) des phénomènes naturels que les méthodes mécaniques, ces dernières sont seules capables d'estimer l'augmentation locale de probabilité de rupture liée à une modification des conditions de stabilité (éboulement partiel, travaux...). Dans ce cas, il pourra être judicieux de coupler les deux approches.

6.2

Nature évolutive de la « prévision »

Il est essentiel de garder à l'esprit que la courbe de probabilité « individuelle » d'éboulement en fonction du temps n'est rien d'autre que la projection de la « fréquence moyenne de rupture » estimée avec les données décrites ci-dessus. Puisqu'elles sont obtenues par répartition proportionnelle d'une fréquence globale moyenne parmi la population des instabilités potentielles détectées, les fréquences individuelles moyennes ne sont pas indépendantes. De ce fait, tout changement de l'une des données entraîne nécessairement une révision complète des fréquences individuelles. Cette révision sera d'autant plus importante que le changement affecte un élément de fort poids relatif. Les causes possibles d'un tel changement sont multiples : changement de fréquence globale moyenne par révision de l'étude historique, éboulement d'une des instabilités potentielles, changement du classement hiérarchique du fait de connaissances nouvelles, détection de nouveaux aléas...

Cet aspect « dynamique » de l'évaluation est essentiel, intrinsèque à ce type d'étude, et l'organisation de l'information doit être conçue en fonction de cette contrainte majeure : traçabilité des informations, transparence des modes de « détection-caractérisation-hiérarchisation » des instabilités potentielles et actualisation des résultats.

6.3

Développements et axes de recherche

Le cadre méthodologique permettant une certaine quantification de la probabilité d'éboulement en fonction du temps pour des instabilités potentielles a été précisé. Les exemples concrets fournis montrent que les données nécessaires sont accessibles, bien que plusieurs améliorations soient à apporter à leur acquisition et à leur traitement.

La première amélioration concerne l'estimation des taux d'éboulement, pour laquelle il convient d'étoffer les premières données disponibles, afin de valider les lois puissance observées et étudier la transposabilité des taux calculés sur une zone vers une partie de celle-ci. Cette recherche pourra comprendre d'une part des analyses d'archives (inventaires d'éboulements existants, traces morphologiques...) et d'autre part l'enregistrement de l'activité actuelle de certaines parois.

L'autre domaine d'amélioration concerne la caractérisation des instabilités potentielles, que nous tentons actuellement de rendre plus précise et homogène grâce à une grille de caractérisation. Elle est en cours de validation et fera l'objet d'une communication ultérieure.

Mais l'applicabilité même de la méthode est avant tout liée à un progrès radical de la hiérarchisation des instabilités potentielles, dont la quantification rationnelle exige une étude statistique des « facteurs de risque » à partir d'une banque de données sur les éboulements. Ce point est crucial et représente un effort important de recherche et de traitement de données, auquel différents services institutionnels sont appelés à collaborer.

- Amitrano D., Grasso J.R., Hantz D. – « From diffuse to localised damage through elastic interaction ». *Geophysical Research Letters* vol. 26, n° 14, 1999, p. 2109-2112.
- Azimi C., Desvarreux P. – « Quelques aspects de la prévision des mouvements des terrains ». *Revue Française de Géotechnique* n° 76, 1996, p. 63-71.
- Cherubini C., Giasi C.I., Cucchiaro L. – « Probabilistic analysis of slope stability in rocks ». *6th International Symposium on Landslides*, Christchurch, Balkema, vol. 1, 1992, p. 361-366.
- Couture R. – « Contribution aux aspects mécaniques et physiques des écoulements rocheux ». Thèse. Département de Génie géologique, Université de Saint-Foy, Québec, Laval, 1998.
- CFG – Caractérisation et cartographie de l'aléa dû aux mouvements de terrain. Laboratoire central des ponts et chaussées, 2000, 91 p.
- Descoeudres F., Zimmermann Th. – « Three-dimensional dynamic calculation of rockfalls ». *6th International Congress on Rock Mechanics*, Montréal, Balkema, 1987.
- Dussauge C., Grasso J.R., Helmstetter A. – « Statistical analysis of rockfall patterns ». Article soumis à *J. Geophysical Research* 2001.
- Glaw U., Lotter M. – « Time prediction of rockslope failures based on monitoring results ». *7th International Symposium on Landslides*, Trondheim, Norway, Balkema, 1996.
- Grasso J.R., Sornette D. – « Testing self-organized criticality by induced seismicity ». *J Geophysical Research* vol. 103, n° B12, 1998, p. 29965-29887.
- Gardner J. – « Rockfall : a geomorphic process in high mountain terrain ». *The Albertan Geographer* vol. 6, 1970, p. 15-20.
- Hungr, Evans O., Hazzard S.G.J. – « Magnitude and frequency of rock falls along the main transportation corridors of south western British Columbia ». *Canadian Geotechnical J.* vol. 36, 1999, p. 224-238.
- Interreg 2c – « Prévention des instabilités de falaises ». Pôle grenoblois d'études et de recherche sur les risques naturels, Grenoble. A paraître (oct. 2001).
- Lahaie F., Grasso J.R. – « A fluid-rock interaction cellular automaton of volcano mechanics : application to the Piton de la Fournaise ». *J. Geophysical Research* vol. 103, n° B5, 1998, p. 9637-9649.
- Noever D.A. – « Himalayan sandpiles ». *Physical Review*, vol. 47, 1993, p. 724-725.
- 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.
- Rochet L. – « Développement des modèles numériques dans l'analyse de propagation des éboulements rocheux ». *6th International Congress on Rock Mechanics*, Montréal, Canada, Balkema, vol. 1, 1987, p. 479-484.