

# Suivi d'une instabilité rocheuse jusqu'à l'éboulement

## Commune de La Perrière (Savoie)

**Laurent EFFENDIANTZ**  
Géologue  
Groupe Mécanique des roches

**Louis ROCHET**  
Chargé de mission auprès du LCPC  
Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Lyon

### Présentation générale

Le 24 mars 1999, un éboulement rocheux menaçant directement le hameau Saint-Jean de la commune de La Perrière s'est produit dans la vallée de Bozel en Savoie (fig. 1). Le phénomène était suivi depuis vingt-cinq ans par le Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Lyon. Une surveillance en temps réel et un modèle de pronostic ont été utilisés lors de la crise finale comme outil d'aide à la décision, pour ce qui concerne notamment les mesures préventives d'évacuation des populations menacées.

### RÉSUMÉ

En 1975, une masse rocheuse instable menaçant un hameau de la commune de La Perrière en Savoie a été équipée d'un système de télésurveillance qui a fonctionné pendant vingt-cinq ans. Au début du mois de mars 1999, l'évolution des mouvements ayant été jugée préoccupante, une cellule de crise fut constituée. La décision d'évacuer le village a été prise le 10 mars 1999 après une semaine de suivi du phénomène. L'éboulement est intervenu le 24 mars 1999.

La mise au point d'un modèle de pronostic d'évolution du phénomène à très court terme a apporté une aide précieuse au suivi de crise, notamment en ce qui concerne l'application des mesures d'évacuation du plan de secours. Les mesures ont permis d'observer les évolutions ultimes, formées d'une succession d'accélération et de rémissions, et le modèle a fourni des pronostics fiables, avec un préavis suffisant.

**MOTS CLÉS :** 43 - Glissement (terrain) - Modèle mathématique - Contrôle - Capteur - Détection - Mouvement - Continu - France - Massif rocheux / - Télésurveillance.

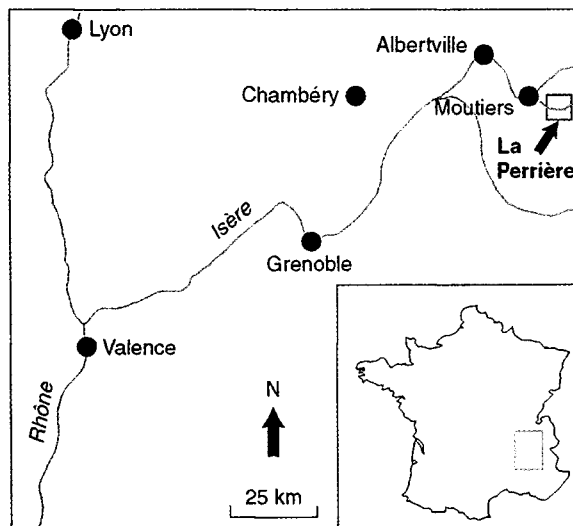


Fig. 1 - Plan de situation.

### Le dispositif de surveillance initial

Un éboulement d'un millier de mètres cubes au-dessus du hameau de Saint-Jean dans la vallée de Bozel en Savoie s'était produit en 1974, à partir d'un éperon en saillie dans le versant.

À la suite de cet éboulement, une instabilité rocheuse a été détectée sur l'éperon dit éperon de la Becqua, constituant une menace grave pour le hameau ; un suivi quotidien du site a été instauré en 1975, avec une mesure déportée manuelle chaque jour, traitée mensuellement par le LRPC de Lyon. Le système a parfaitement fonctionné et montré une ouverture croissant d'année en année.

Une légère accélération du mouvement ayant été constatée depuis 1986, une surveillance automatisée a été mise en place en 1992. Une étude générale de stabilité et de protection a également été réalisée par le LRPC. Cette étude a notamment mis en évidence une fissure ouverte à l'arrière d'un nouveau compartiment rocheux instable de plusieurs milliers de mètres cubes sur la partie supérieure de l'éperon. Par ailleurs, de nombreuses instabilités plus modestes encadrant latéralement le secteur de l'éperon, ont été reconnues.

Depuis, le LRPC de Lyon a effectué une prestation de maintenance de trois capteurs de déplacement potentiométriques (dont un de référence) installés sur le site et d'un système d'acquisition (pas d'acquisition : 1 heure) localisé dans les locaux de la mairie de La Perrière, le suivi du site étant assuré par le personnel de la mairie, avec transmission mensuelle des données au LRPC. La télésurveillance avait pour but de déceler une menace d'éboulement de façon à déclencher des

procédures de sécurité, en attendant que des travaux de protection prescrits par l'étude de 1992 soient réalisés. Ces travaux ont été exécutés en 1994. La hauteur des ouvrages ayant été ramenée de 6 à 5 m par rapport au projet initial, et le merlon central ayant été aminci au droit du château d'eau communal (contrainte d'exécution), l'aléa principal a été maintenu sous surveillance (fig. 2).

### L'évolution du phénomène vers la crise terminale

La vitesse moyenne du mouvement enregistré par les capteurs, de l'ordre de 0,005 mm/j avant 1985 et de 0,04 mm/j avant fin 1996, a atteint 0,1 mm/jour le 22 février 1999 ; le mouvement s'est ensuite progressivement accéléré, passant à 1 mm/jour à partir du 1<sup>er</sup> mars 1999, valeur considérée comme seuil de mise en vigilance dans le dernier rapport annuel du LRPC (31 décembre 1998) (fig. 3).

Sur les conseils de la préfecture de la Savoie, Direction de la protection civile, le LRPC a été sollicité par le maire de La Perrière (courrier en date du 2 mars 1999) pour « transmettre dans les plus brefs délais tous les éléments permettant de prendre, en fonction des risques encourus, les dispositions nécessaires pour garantir la sécurité publique ».

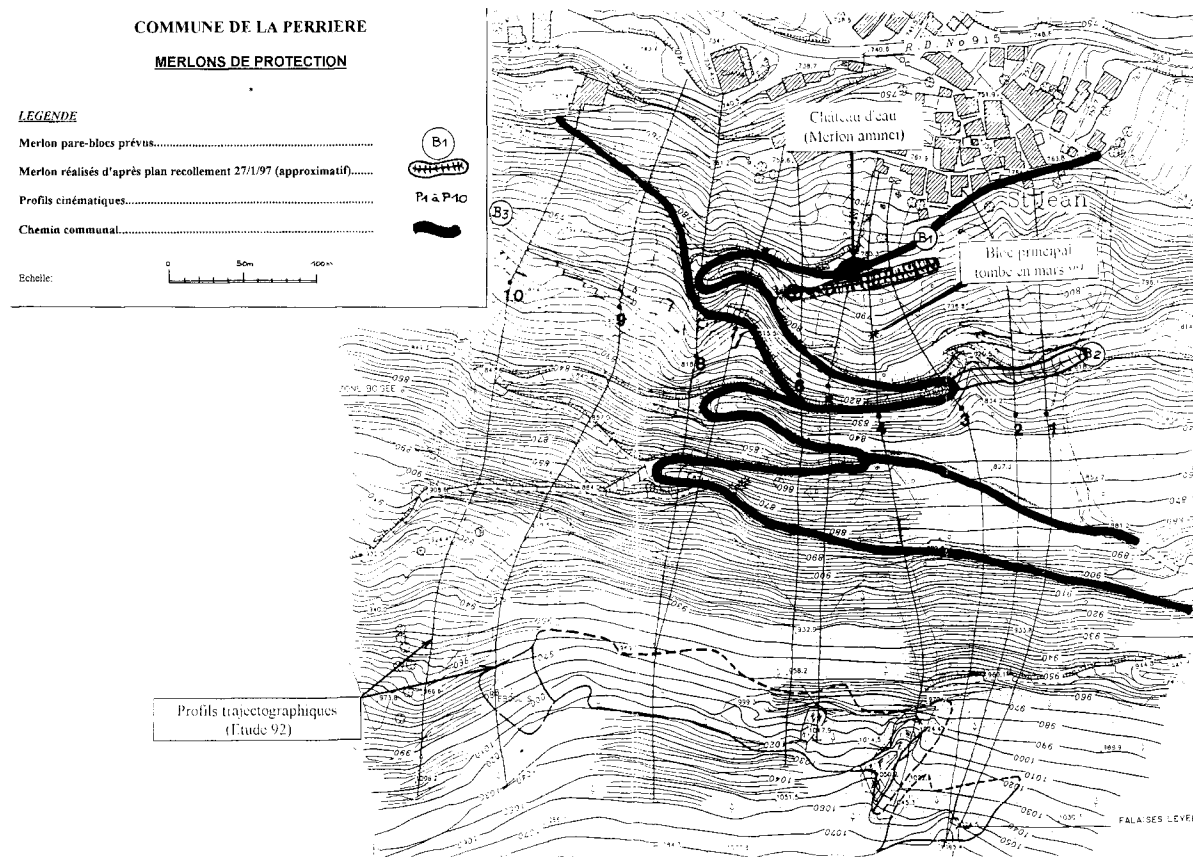
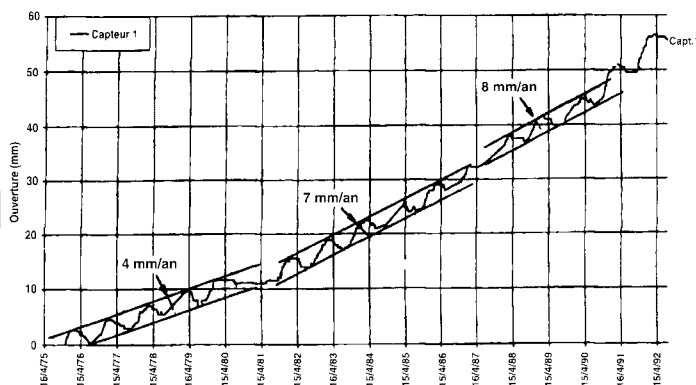
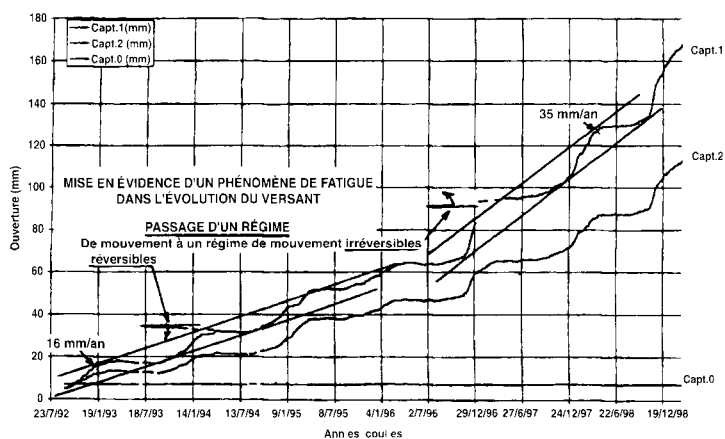


Fig. 2 - Profils trajectographiques de l'étude 1992 et implantation des merlons de protection.

**PITON DE LA BECQUA  
-COMMUNE DE LA PERRIÈRE (73)  
Evolution de l'ouverture des capteurs (mm)  
1975/1992**



**PITON DE LA BECQUA  
-COMMUNE DE LA PERRIÈRE (73)  
Evolution de l'ouverture des capteurs (mm)  
1992-28/02/1999**



**PITON DE LA BECQUA  
-COMMUNE DE LA PERRIÈRE (73)  
CRISE TERMINALE**

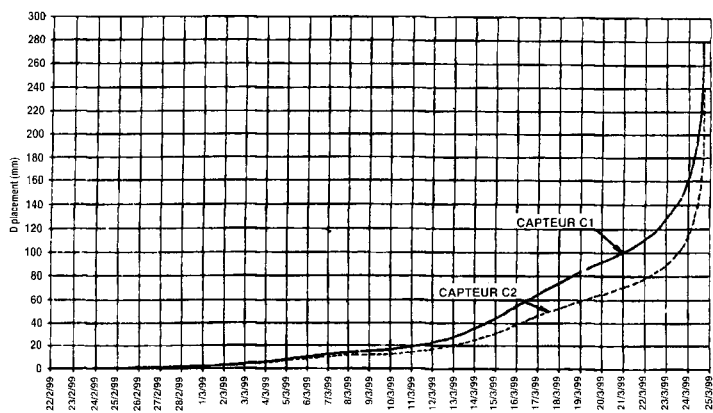


Fig. 3 - Évolution du phénomène de 1975 à la crise terminale de mars 1999.

## Présentation géologique et structurale du site

### Géologie

Le piton haut de 70 m constitue un élément en saillie dans la continuité d'un épaulement rocheux, surmon-

tant un talus d'éboulis d'environ 200 m de dénivelée. Situé en versant gauche de la vallée du torrent Doron de Bozel, en contre-haut du village de La Perrière, son sommet se situe approximativement à la cote 1050. Le piton est constitué d'alternances schisto-gréseuses d'âge houiller dont la foliation orientée N30° à N40° est très redressée vers l'ouest.

L'examen des photos aériennes obliques et les reconnaissances géologiques de terrain ont permis de définir le modèle structural de l'éperon rocheux de La Becqua en mettant en évidence notamment la stratification originelle N25 – 50°W. Cette stratification détermine à la partie haute du site des structures empilées à fort pendage ouest, dont l'élément supérieur a la forme d'une casquette coiffant la partie droite de l'éperon, casquette séparée du massif par une fissure arrière de 50 à 70 cm d'ouverture.

La casquette, constituée d'une dalle de micaschistes à biotite très quartzeux, est massive. Ses dimensions sont approximativement de 15 m x 15 m sur 3 à 4 m d'épaisseur.

### Modèle structural

Une fracture N 30° verticale bien individualisée et continue sur toute la hauteur sépare le promontoire en deux parties, est et ouest (fig. 4).

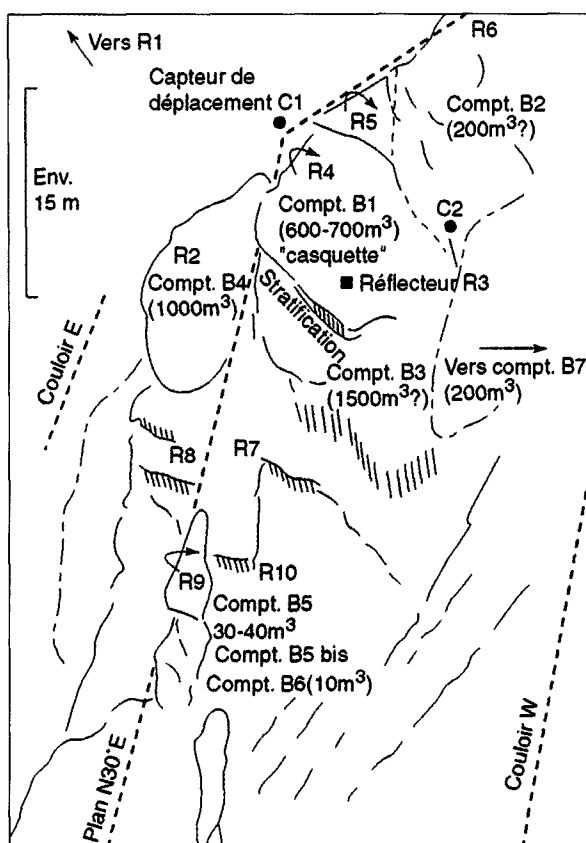


Fig. 4 - Esquisse structurale du site.

### Partie est (gauche)

- fracturée mais sans indice de rupture majeure (B4 sur le schéma ci-dessus)
- présence de plans glissoires orientés N110 – 65 à 70°N, lesquels ont déterminé la niche d'arrachement de l'éboulement de 1974, bien visible au 2/3 inférieurs du piton

### Partie ouest (droite) de haut en bas

- casquette (B1) d'environ 15 x 15 x 3 m de micaschistes quartzeux citée précédemment. Volume estimé de 600 à 700 m<sup>3</sup>
- « triangle » (B3) de 10 m d'épaisseur tectonisé, reposant sur une base complètement esquillée sur un mètre d'épaisseur – volume estimé à 1 500 m<sup>3</sup>
- base de 10 m de hauteur complètement disloquée, soufflée. Cet élément constitue la « rotule » ou charnière, à déformation diffuse. Volume estimé à 2 000 m<sup>3</sup>

Partie inférieure stable avec une structure plus massive surmontant le talus d'éboulis.

## Le dispositif de suivi du mouvement

### Les capteurs de déplacement et le système de télésurveillance

La fissure arrière de la « casquette » surmontant l'éperon était équipée des dispositifs suivants :

- deux capteurs de mesure de déplacement du LPC Lyon, de type potentiométrique linéaire 4-20 mA pour une étendue de mesure comprise entre 0 et 25 mm. Ces capteurs ont été remplacés en phase terminale par des capteurs de course nominale 0-125 mm (portée à 150 mm) ;
- deux repères manuels de déplacement du LPC Lyon, de type étrier métallique permettant de procéder à un contrôle des capteurs ou à un recalage si un instrument de mesure automatique a été endommagé accidentellement ;
- une sonde de température permettant éventuellement d'établir des corrélations déplacement-température, d'une plage de mesure comprise entre – 30,5 °C et + 72 °C pour 4 à 20 mA ;
- un réseau filaire de recueil des données au droit des différents capteurs et d'acheminement en direction de la centrale d'acquisition (située dans la mairie) ;
- le matériel est protégé contre des surtensions pour un choc de 20 kA avec mise à la terre.

Le collecte des données stockées dans la centrale est assurée par une liaison RS 232 avec l'aide d'un micro-ordinateur basé en mairie. Le logiciel de télésurveillance du LRPC assure la gestion complète de l'installation, du traitement des mesures à l'alerte vocale sur le réseau commuté en cas de dépassement de seuil d'un capteur.

### Le dispositif de mesures topométriques

Les déplacements relevés sur les lèvres de la fissure indiquent un sens de déplacement vers la vallée conforme à la direction de fracture N 30° et à la schistosité, alors qu'une logique d'« élément casquette » indépendant voudrait qu'il glisse vers l'ouest selon le plan de stratification sur lequel il est posé. L'examen de l'appui du pourtour inférieur et latéral de la casquette n'a pas

montré d'indices de rupture et de déplacements particuliers. Ceci nous a amené à imaginer un mouvement de plus grande ampleur intéressant toute la moitié supérieure droite de l'éperon ayant sa racine dans la partie basse disloquée située à mi-pente du piton.

Un système de mesures topométriques (mesures de distance par infrarouge) appuyé sur dix réflecteurs répartis sur la face avant du piton a été mis en place le 17 mars 1999 (cf. réflecteurs R1 à R10, fig. 4). Les premières mesures confirment le modèle évoqué ci-dessus.

Il convient de signaler que ce dispositif, de mise en œuvre plus légère que les capteurs potentiométriques équipant le site depuis l'origine, permet de s'affranchir des câbles de liaison. Il a été installé pour avoir une perception d'ensemble sur la stabilité de l'éperon et permettre le relais de la télésurveillance, après l'écroulement de la partie en mouvement. La précision, environ dix fois moindre (0,1/1 mm) que celle des capteurs potentiométriques, n'aurait pas permis de suivre le détail de la progression parfois chaotique des vitesses du phénomène, mais s'avère néanmoins suffisante pour différencier sans ambiguïté les parties en mouvement et les parties immobiles du versant. Par ailleurs, la mise en œuvre de ce dispositif avant l'éboulement a permis de calibrer les mesures avec les données des capteurs de déplacement.

Les réflecteurs, moyennant des aménagements spécifiques de sécurisation contre les chocs et agressions naturelles, pourront être laissés sur le terrain comme dispositifs « dormants » pouvant faire l'objet d'auscultations périodiques espacées dans le temps.

## Le suivi du phénomène

### Rappel de la cinématique du mouvement

Les courbes déplacements/temps (fig. 3) présentent depuis l'origine des mesures une allure caractéristique avec la superposition de deux composantes. Une composante cyclique régulière et réversible de périodicité annuelle et d'amplitude 3 mm a été corrélée aux variations météorologiques (température moyenne mensuelle). À cette composante se surimpose une dérive linéaire nette à plus long terme (de l'ordre de 2 à 3 mm/an à l'origine). Tous les quatre à cinq ans, on note des cassures de pente sur les courbes, le graphe évolue sous forme d'une succession de segments de droites avec un accroissement progressif des pentes.

La composante cyclique régulière des déplacements induit vraisemblablement un phénomène de fatigue dans la partie sollicitée du massif. Sur le long terme ce processus aboutit à des modifications irréversibles dans le régime de comportement mécanique du massif. Les changements de pente successifs et croissants de la courbe des vitesses sont représentatifs de cette évolution.

L'évolution des vitesses depuis le 1<sup>er</sup> mars 1999, date de franchissement du seuil d'alerte signalé par la mai-

rie, jusqu'à l'éboulement intervenu le 24 mars 1999, est donnée succinctement ci-après.

De 1 mm/jour le 1<sup>er</sup> mars 1999, la vitesse a très rapidement crû jusqu'à 2 mm/jour le 6 mars pour atteindre 10 mm/jour à l'issue d'une phase d'accélération continue entre le 8 et le 13 mars. La vitesse maximale a été atteinte le 16 mars 1999 avec 11 mm/jour. Une légère décréue est ensuite intervenue, avec une vitesse constante, légèrement inférieure à 9 mm/jour. Une nouvelle accélération portant la vitesse à un palier de 12 mm/jour a été enregistrée le dimanche 21 mars 1999. La vitesse a ensuite progressé par à-coups, correspondant vraisemblablement à des ruptures successives dans l'assise de la partie mobile, de 14 mm/jour le 22 mars 1999 à 24 mm/jour le 23 mars 1999, puis 90 mm/jour à 15 heures le 24 mars 1999 pour atteindre une vitesse instantanée de 500 mm/jour vingt minutes avant la rupture intervenue à 16 heures 50 minutes le 24 mars 1999.

### Élaboration d'un outil de suivi adapté à la crise terminale

À partir des données des capteurs de déplacement équipant le site, un modèle cinématique d'évolution du phénomène a été mis au point, permettant d'effectuer des pronostics sur l'occurrence de l'éboulement.

Le changement de régime dans l'évolution du site instrumenté depuis 1975 s'est traduit par une augmentation nette des vitesses, qui a justifié la recherche et la mise au point d'un outil adapté à un suivi très fin du phénomène permettant d'être plus pertinent dans le pilotage de la cellule de crise.

Les données délivrées par les capteurs étant des valeurs de déplacement brutes, il a d'abord fallu retenir un critère de vitesse le plus représentatif de l'évolution du phénomène. Sur la base d'un pas d'acquisition des données limité à un quart d'heure, le choix s'est porté sur une vitesse moyenne calculée sur une période de 24 h ( $V_{m24}$ ). Cette moyenne était suffisante d'une part pour éliminer très significativement le bruit de fond, ce qui n'était pas le cas pour les autres  $V_m$  testées ( $V_{m5}$  et  $V_{m12}$ ), mais ne masquait pas l'émergence de nouvelles évolutions. Dès l'origine du suivi de crise, les vitesses ont été actualisées en continu avec un pas glissant d'un quart d'heure.

Plusieurs modèles de divergence ont été testés afin d'examiner leur représentativité vis-à-vis de la cinématique d'évolution du site et notamment des crises antérieures. La variable retenue pour l'analyse est

$$\Delta t_{10} = \frac{10}{V_{m24}}, \text{ intervalle de temps (exprimé en jour)}$$

nécessaire pour enregistrer un déplacement de 10 mm (si la vitesse se maintient constante et égale à  $V_{m24}$ ). On notera que la valeur  $\Delta t_{10}$  évaluée tous les quart d'heures est égale à l'inverse de la vitesse exprimée en cm/j.

## Le modèle hyperbolique

Un premier modèle, dit de divergence hyperbolique, a été testé :  $\Delta t_{10} = f_H(t)$ . Sa représentation graphique est effectuée en coordonnées linéaires comportant le temps en abscisse et  $\Delta t_{10}$  en ordonnées (fig. 5a).

Les phases d'accélération du phénomène se traduisent par une accentuation de la pente du graphe. Une divergence de la vitesse se traduit par une pente linéaire négative de la courbe d'évolution. Classiquement dans ces cas, le prolongement de la pente du graphe recoupe l'axe des x un point qui, en l'absence de modification de la cinématique du mouvement, peut être interprété comme la date probable de l'éboulement (vitesse infinie).

L'application de ce modèle aux données de crises antérieures, notamment celles du 27-28 février 1999 et du 1<sup>er</sup> au 3 mars 1999, aurait conduit à un pronostic de rupture dans un délai de 24 heures et aurait entraîné dans les deux cas un déclenchement injustifié de la procédure d'évacuation. D'une manière plus générale, le modèle hyperbolique conduisait pour le site de La Perrière à une évaluation inadaptée et manifestement trop faible du délai de divergence. D'autre part, celui-ci était inférieur ou égal au délai de préavis d'évacuation, ne permettant pas de déceler, avant le déclenchement de cette décision pratiquement irréversible, l'apparition des phases de rémission.

## Le modèle exponentiel

Le modèle hyperbolique ayant démontré son inadéquation à la gestion de la crise, un autre modèle de divergence de type exponentiel, plus amorti, a été testé sur le site et retenu pour la gestion de la crise après validation. Ce modèle est défini par une relation de la forme :  $\text{Log } \Delta t_{10} = f_E(t)$ . Son expression graphique est représentée sous forme d'une courbe semi-logarithmique, axe des temps en abscisses linéaires et valeurs des  $\Delta t_{10}$  en ordonnées logarithmiques (fig. 5b).

Ce type de graphe implique (à la différence du précédent modèle) de choisir un seuil de référence de vitesse comme critère d'alerte d'imminence de l'éboulement. Compte tenu de la connaissance préalable du phénomène, un seuil de 10 mm/j a été retenu.

Les tests effectués avec le modèle exponentiel sur les données des crises antérieures (27-28 février et du 1<sup>er</sup> au 3 mars 1999) ont permis de vérifier que ce modèle conduisait à des pronostics de divergence plus réalistes sans déclenchement intempestif de la procédure d'évacuation. Il s'est avéré que le meilleur amortissement du modèle exponentiel permettait de déceler l'apparition de phases de rémission et d'éviter l'application prématurée des mesures d'évacuation. Pour cette crise un délai de référence de 48 heures, correspondant à la mise en œuvre de l'opération d'évacuation de la population, avait été énoncé par les autorités en charge du plan de secours.

Globalement, ce modèle (comme le modèle hyperbolique d'ailleurs) a confirmé dans l'évolution du phénomène des phases de crises successives séparées par des phases de rémission :

- crises du 28 février et du 3 mars 1999,
- rémission avec nette diminution des vitesses,
- crise majeure du 10 mars 1999,
- rémission sans diminution sensible des vitesses,
- crise terminale du 21 au 24 mars 1999.

## Le pronostic

L'analyse des vitesses lors de la crise initiale du 28 février 1999, selon le modèle exponentiel, laissait prévoir le franchissement du seuil de 10 mm/j quatre jours plus tard (fig. 5b). Ce délai laissait largement le temps d'attendre pour la mise en œuvre du plan de secours compte tenu du délai d'activation (temps requis pour prévenir tous les habitants y compris ceux travaillant à l'extérieur, période nocturne non utilisable, etc.).

Après une rémission du phénomène accompagnée d'une nette diminution des vitesses, une forte accélération est intervenue la nuit du 9 au 10 mars et s'est confirmée dans l'après-midi du 10 ; il a été décidé, en accord avec la mairie et la préfecture, de mettre en œuvre immédiatement le plan de secours en fin d'après-midi du 10 mars.

Dans l'hypothèse de la persistance de la crise, toute attente supplémentaire risquait en effet d'entraîner un déclenchement du plan de secours en période nocturne avec tous les risques et les difficultés d'application que cela aurait impliqué. Le scénario d'éboulement spontané était alors considéré selon le modèle de divergence exponentiel comme vraisemblable à une échéance de 35 heures.

Le 16 mars, l'accélération du mouvement s'est réduite notablement, mais les vitesses sont restées très élevées, de l'ordre de 11 mm/jour. Il a été admis, après un nouvel examen du site, que cet état de choses pouvait perdurer sur une période dont la durée ne pouvait être précisée, courte à l'échelle du phénomène, mais difficilement supportable au niveau des contraintes vis-à-vis des personnes déplacées.

Une stratégie parallèle visant à fixer un terme à la durée de l'évacuation a conduit à préparer une opération de reprofilage du sommet de la zone instable, qui demandait au minimum une semaine de préparation, compte tenu des contraintes administratives, de la difficulté des travaux et de leur caractère délicat sur le plan de la sécurité.

Cette solution alternative ne pouvait être réalisée qu'en l'absence de redémarrage d'une nouvelle crise, probable, mais dont l'échéance était alors indéterminée. Les premiers symptômes de l'apparition d'une nouvelle crise se sont manifestés le 22 mars. Le 23 mars, il est apparu évident que l'activité avait redémarré, et il n'était plus envisageable pour des raisons évidentes de

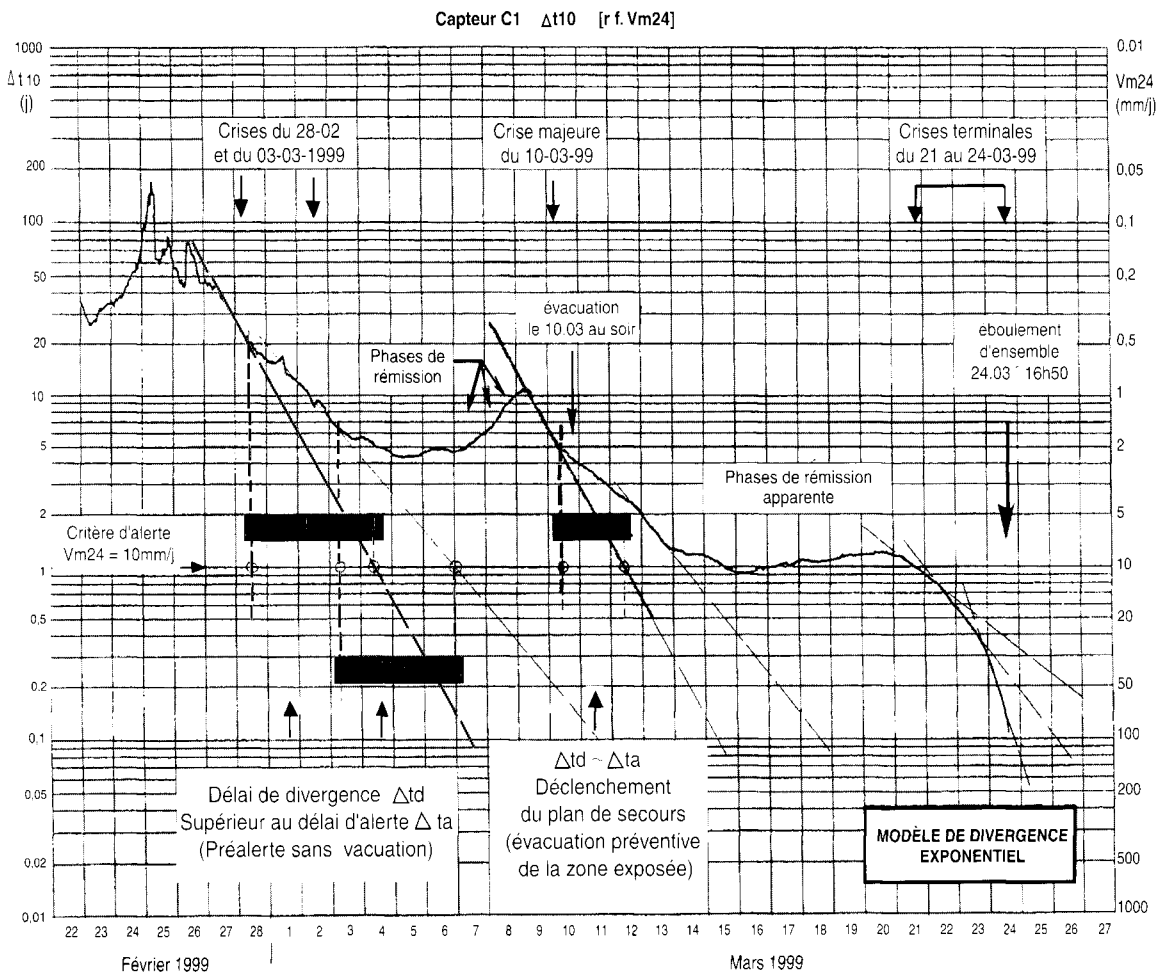
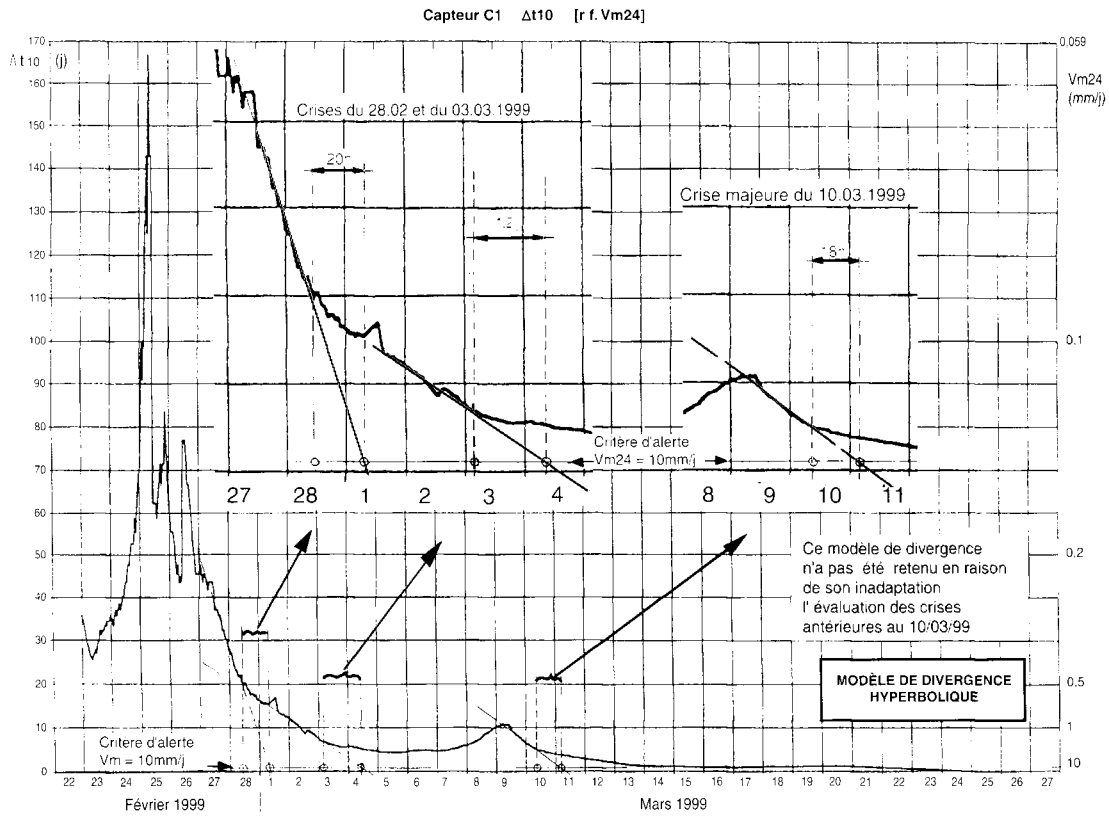


Fig. 5 - Modèles de pronostic.

sécurité d'effectuer des travaux sur le site alors que réapparaissait un scénario de divergence à court terme sur la base du modèle de pronostic.

En conséquence, le 23 au soir, la décision a été prise par le maire et le sous-préfet d'ajourner les travaux de reprofilage et de préparer une intervention plus légère de nettoyage et purge de la cicatrice après réalisation spontanée de l'éboulement. Cette appréciation s'est avérée pertinente, le graphe prenant une allure de plus en plus convexe jusqu'à la rupture finale. L'éboulement est intervenu le 24 mars à 16 heures 50 minutes, après quelques chutes localisées de petits blocs dans les heures précédentes. Après l'éboulement, les travaux de purge ont été engagés dès le lendemain. La route a été rétablie sous surveillance de chantier. La réintégration de la population, commencée le 25 mars pour la partie aval de la route, s'est achevée le 27 mars 1999, après réalisation des purges les plus importantes (minages).

### Commentaire

Le modèle décrit au paragraphe précédent s'est avéré un outil très utile au suivi de l'évolution du phénomène tout au long de la crise jusqu'à l'éboulement terminal. La mise en œuvre de cette méthode a été primordiale pour le pilotage de la crise et l'aide aux décisions cruciales de préalerte et de mise en œuvre du plan de secours. Dans le cas présent, indépendamment de la décision d'évacuation, l'utilisation du modèle a permis de justifier la non réintégration immédiate des populations lors de la rémission du 14 au 19 mars. Cette situation délicate à gérer sous la pression des événements serait vite devenue intenable sans l'apport de l'outil de pronostic.

Malgré tout, cet outil ne doit être considéré que comme une aide à très court terme au pronostic de crise, moyennant une réactualisation permanente des graphes, un calage et des adaptations propres aux conditions cinématiques du phénomène suivi. Toute extrapolation de cette méthode en vue de prévisions à moyen ou long terme serait abusive, en raison notamment de l'évolution du modèle de comportement du site liée au développement des déformations et du mécanisme de rupture.

### Autres modèles de pronostic

Une autre méthode, proposée par Azimi et al. (1989), a également été testée sur les données de la période de crise comprise entre fin février 1999 et la phase terminale. Son application aux deux crises du 26 au 28 février et du 1<sup>er</sup> au 3 mars 1999 a montré que cette méthode aurait conduit dans les deux cas à un pronostic de rupture non pertinent. La même observation a été faite pour la crise principale du 8 au 10 mars, conduisant à l'estimation d'un délai trop court et jugé incompatible avec la mise en œuvre de la procédure d'évacuation. Par contre, la phase terminale précédant immédiatement la rupture a pu être convenablement représentée.

## L'éboulement

### Description

Dans les heures précédant l'événement, de nombreuses chutes de blocs de taille pluridécimétrique ont été observées, essentiellement à partir du secteur ouest du piton. Le départ de l'éboulement s'est initié perpendiculairement au versant selon la direction de schistosité, puis très rapidement la casquette a glissé avec une nette composante vers l'ouest, entraînant sous elle son assise fragmentée, sur les dalles inférieures massives.

On peut parler d'une véritable glissade en « surf » dès le premier contact avec les éboulis, puis presque immédiatement l'ensemble s'est dissocié en deux, puis trois groupes de blocs. Les deux premiers se sont arrêtés l'un à mi-pente, l'autre sur la première plate-forme de la piste forestière. Le troisième, après avoir poussé devant lui un véritable empilement de troncs d'arbres, s'est planté dans la même plate-forme et a pulvérisé le talus aval d'une hauteur d'environ 2 mètres à cet endroit (fig. 6).

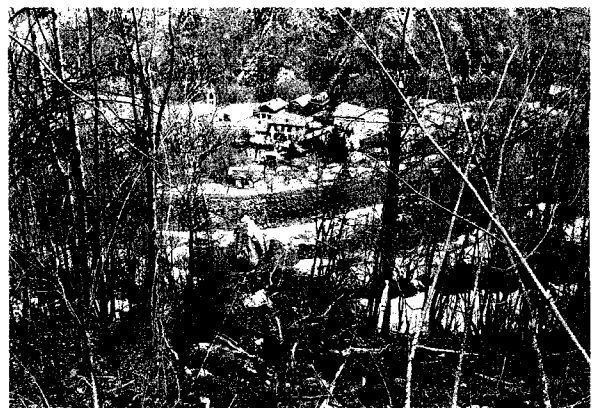


Fig. 6

Le bloc, d'un volume estimé à  $60 \text{ m}^3$ , a ensuite continué sa trajectoire en roulant, son grand axe étant perpendiculaire à la ligne de plus grande pente. Il a écrasé la végétation et écorné successivement les trois plates-formes inférieures de la piste forestière pour finalement s'arrêter sur le bourrelet d'un ancien merlon rudimentaire environ 70 mètres avant le merlon de protection inférieur.

Le volume global des éléments, désormais dispersés, de la casquette est d'environ  $600 \text{ m}^3$ , auxquels il convient d'ajouter environ  $900 \text{ m}^3$  de matériaux fracturés sous-jacents entraînés par l'éboulement. Ces matériaux sont pour l'essentiel répartis sur le versant sur 70 m de longueur à l'amont de la plate-forme supérieure de la piste forestière.

### Analyse des trajectoires

L'examen des trajectographies réalisées en septembre 1992 dans le cadre de la mise au point du projet de merlon indique que la trajectoire du bloc descendu le plus bas en 1999 est bien axée sur le merlon inférieur, mer-



lon dont la construction avait été jugée prioritaire à l'époque. Les simulations réalisées prenaient toutes en compte une rotation du bloc dès le premier impact, ce qui conduisait systématiquement les blocs jusqu'au contact du merlon.

En effet, le mouvement mis en évidence par les deux capteurs depuis l'origine des mesures, à savoir un déplacement en tiroir selon la direction de la schistosité et une rotation verticale vers la vallée, qui s'est vérifié presque jusqu'à l'écroulement, aurait pu conduire à un départ en « cerceau » si le mouvement n'avait pas pris in extremis une composante latérale.

Dans cette hypothèse, il est vraisemblable que le merlon, aminci au droit du château d'eau (contraintes d'implantation) aurait subi de gros désordres. Par ailleurs, il convient de signaler que les deux merlons équipant le site n'étaient dimensionnés que vis-à-vis des aléas d'importance secondaires encadrant l'éperon de la Becqua.

La nature très résistante de la casquette constituée d'une dalle monolithique de micaschistes quartzeux, en évitant une fragmentation précoce, a favorisé sa propagation initiale à plat, comme une plaque, retardant voire empêchant ainsi le processus classique de mise en rotation et de rebonds. Ceci explique que fortuitement la propagation du bloc inférieur n'ait pas atteint le village.

## Conclusion

L'expérience du suivi de crise du piton de la Becqua est exemplaire. La connaissance du phénomène acquise au

travers du suivi continu du site pendant vingt-cinq ans a permis de détecter le passage au stade terminal de l'évolution du versant. Dans la gestion de cette dernière phase, l'établissement d'un modèle de pronostic glissant s'est avéré une aide précieuse au pilotage du plan de secours dans le cadre de l'assistance technique apportée à la cellule de crise.

En phase terminale, les mécanismes d'évolution de la stabilité du versant rocheux, difficilement accessibles à l'analyse et de plus souvent largement commandés par des facteurs extérieurs mal prévisibles (hydrométéorologiques) se traduisent par des irrégularités et des à-coups (accélérations/rémissions) dans la cinématique des phénomènes. Ceci explique que les pronostics basés sur des modèles mathématiques d'extrapolation de tendances puissent être mis en défaut. Ces outils ne doivent donc être considérés qu'avec prudence, comme une aide à très court terme au pronostic de divergence.

Malgré le caractère relativement restreint des enjeux associés à cette crise, l'efficacité du dispositif de suivi technique n'a pu être valablement assurée dans la permanence et la durée que moyennant un engagement important, notamment en ce qui concerne le nombre et la qualité des intervenants ; cet engagement de crise, dont le montant peut être estimé à plusieurs centaines de milliers de francs, contraste très nettement avec les moyens modestes qui ont permis le suivi du phénomène depuis 1974. À titre de repère, pour les dernières années précédant la crise terminale le coût annuel de la maintenance du dispositif de télésurveillance du site était de l'ordre de 20 000 F.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ROCHET L. (1984), *Auscultation et télésurveillance des massifs rocheux instables* – Proc. 4<sup>th</sup> int. Symp. on Landslides, Toronto.

AZIMI C., BIAREZ J., DESVARREUX P., KEIME F. (1988), *Prévisions d'éboulement en terrain gypseux*, Comptes rendus du 5<sup>e</sup> Symposium international sur les glissements de terrain, Lausanne, pp. 531-536.

RAT M. (1990), *Problèmes posés par la prévision de la rupture des mouvements de terrain*, Comptes rendus du 5<sup>e</sup> Symposium international sur les glissements de terrain, Lausanne, juillet 1988, vol. 3, pp. 1503-1504.

GERVEAU E. (1991), Étude et prévision de l'évolution des versants naturels en mouvement. Coll. Études et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Série géotechnique, GT 47, 194 pages.

ROCHET L. (1992), Auscultation, Diagnostic – Surveillance – Bull. A.I.G.I n° 45 – pp. 43-57.

Guide Technique LCPC – (1994) – Surveillance des pentes instables. 125 pages.

## **ABSTRACT**

### **Monitoring an unstable rock mass until its fall in the Commune of La Perrière (Département of Savoie)**

L. EFFANDIANTZ, L. ROCHET

In 1975 an unstable rock mass that threatened a hamlet in the commune of La Perrière in the Département of Savoie was equipped with a remote monitoring system which operated for 25 years. In early March 1999 changes in movement gave rise to concern and an emergency committee was set up. The decision to evacuate the village was taken on 10 March 1999 after one week's monitoring of the situation. The rockfall occurred on 24 March 1999.

The development of a very short term forecasting model was of great value for monitoring the crisis, in particular with regard to application of the evacuation measures set out in the safety plan. Measurements provided a means of observing the final changes, consisting of a succession of accelerations and remissions, and the model output reliable forecasts and gave adequate warning.