

## La rupture différée en mécanique des roches

*Delayed failure in rock mechanics*

P. HABIB

LMS-G.3S, École polytechnique

### Résumé

Différents cas réels de ruptures différées sont présentés et commentés ainsi que la méthode de mesure en laboratoire de la résistance à long terme d'échantillons de roches. Dans la pratique des massifs rocheux, il peut y avoir rupture à long terme simple, mais aussi vieillissement des matériaux, évolution des sollicitations, ou relaxation et fatigue, ce qui rend la prévision particulièrement difficile.

### Abstract

Different case histories of rock masses delayed failures are presented and commented. Laboratory long term strength measurement of rock samples is presented. For rock masses simple delayed failures can occur but it is possible to have weathering, solicitation evolution, or relaxation and fatigue, so that precasting is specially difficult.

## 1. Introduction

Au commencement d'un grand glissement ou d'un effondrement rocheux resté stable pendant longtemps, des déplacements ou des fissurations apparaissent. On les met en évidence par des mesures topographiques ou des mesures de déformations. Mais l'évolution des mouvements peut être lente ou brutale et la progression des mesures est difficile à extrapoler pour définir l'instant de la rupture, même en utilisant des lois en  $\log t$  ou en  $t^{1/n}$ . On a même vu, dans certains cas, que des mouvements préliminaires... pouvaient s'arrêter. Après les grands déplacements viennent ralentissement et stabilisation, mais de toute façon le « passage à l'acte » reste difficile à prévoir.

## 2. Quelques exemples

La rupture différée en mécanique des roches est à l'origine des accidents les plus imprévisibles, donc les plus dangereux car pouvant entraîner de véritables catastrophes.

On peut citer :

*En souterrains.* Le cas du tunnel de Vierzy : le 16 juin 1972, des ouvriers en train de rénover le revêtement d'un tunnel de la SNCF cessent le travail à la fin de la journée et quittent le chantier. Quelques heures plus tard, la voûte s'effondre, puis un train percute le tas de blocs tombés sur la voie et la motrice s'encastre dans la chapelle au toit du tunnel, puis un second train venant dans l'autre sens percute l'ensemble. Une centaine de morts.

*En falaise.* Le 23 juin 2002, près du Tréport, au Mesnil-Val, une falaise donne des signes de faiblesse. L'INERIS et le BRGM, agissant dans le cadre du projet européen « Protect », décident de l'instrumenter. Six

mois plus tard elle s'effondre. Il est remarquable que les mesures topographiques n'ont pas montré grand-chose, mais que les géophones et les accéléromètres (pour l'écoute des bruits) ont montré, au cours des dernières vingt-quatre heures, que des craquements se faisaient entendre signalant qu'une évolution était en cours<sup>(1)</sup>.

*En mine.* Pendant le siècle passé il s'est produit une quinzaine d'effondrements spontanés dans les bassins ferrifères de Lorraine, c'est-à-dire sans que ces ruptures aient été prévues ou désirées. Certains ont eu lieu en cours d'exploitation. En général, on a pu évacuer les hommes et le matériel, mais pas toujours. D'ailleurs, ceci n'a pas empêché parfois des pertes humaines à cause de l'effet de souffle. Ces effondrements en cours des travaux doivent, tout de même, être considérés comme des ruptures différées en ce sens que le travail du chantier, pour arriver à des taux de défrètement importants, peut prendre du temps. Des effondrements se sont produits pendant les travaux mais aussi bien après les travaux, des années ou des dizaines d'années après l'exploitation du minerai de fer<sup>(2)</sup>.

*En carrière.* Le cas de Clamart est exemplaire : il s'agit d'une carrière souterraine de craie et le site avait été déclaré inconstructible avant la dernière guerre par l'Inspection des carrières, au motif que l'ingénieur des Mines - Armand Mayer (qui, bien après, fut le premier président du Comité français de

<sup>(1)</sup> G. Senfaute, V. Merrien-Soukatchoff, J. Morel, J.C. Gourry, « Microseismic monitoring applied to prediction of chalk cliffs collapses and contribution of numerical modelling », *Int. Conf. on Fast Slope movements-prediction*, Sorrento, May 2003.

<sup>(2)</sup> Documents du Service technique des mines de fer de l'Est. E. Tincelin (avril 1959), et E. Tincelin et Sinou (juin 1959).

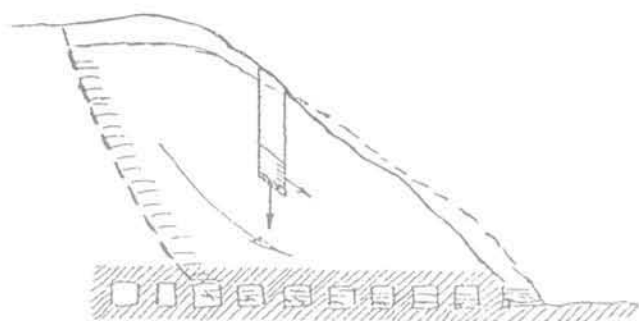


FIG. 1 Schéma de l'accident de Champagnole. Champagnole quarry failure.

mécanique des roches) – avait estimé la contrainte moyenne dans les piliers 2 MPa, alors que la résistance de la craie était de 3 MPa, ce qui était insuffisant. Au bout de vingt-cinq ans, il fut décidé, en l'absence d'incidents, de construire quand même, non de grands bâtiments mais des petites résidences dont le poids était négligeable par rapport à celui du recouvrement, avec des caves peut-être même que pour certaines c'était un allègement. Cinq ans plus tard, le 1<sup>er</sup> juin 1961, un effondrement complet de la carrière s'est produit. Une dizaine de morts. Les sinistres de Vierzy et de Clarmart ont fait l'objet d'expertises judiciaires.

On peut rappeler aussi l'effondrement brutal le 27 juillet 1964 d'une carrière souterraine approvisionnant une cimenterie à Champagnole. La carrière était exploitée par chambres et piliers et ceux-ci se sont écrasés sous l'effet du cisaillement occasionné par la pente générale du site. Il y a eu des pertes humaines et cet accident a emprisonné pendant quelques jours des mineurs qui travaillaient dans une partie de la carrière qui ne s'était pas effondrée; leur sauvetage a été très éprouvant (Fig. 1).

Cet accident est intéressant en ce sens qu'il montre que la rupture différée ne se produit pas uniquement lorsqu'une structure est sollicitée essentiellement en compression simple ou en traction. La carrière de Champagnole était exploitée par chambres et piliers; elle se développait sous une pente; la charge était donc croissante avec la hauteur du recouvrement, mais la résistance à la compression des piliers était suffisante. Malheureusement, sous une pente, la verticale n'est pas une direction d'une contrainte principale (Fig. 1). Il en résulte l'apparition en tête des piliers d'un cisaillement horizontal qui peut mener à la ruine. D'ailleurs, la surface de rupture a bien montré qu'un glissement et un déplacement horizontal s'étaient produits et avaient renversé et écrasé les piliers<sup>23</sup>.

Le petit croquis (a) de la figure 2 représente le domaine d'équilibre limite d'une fondation superficielle sur un sol pulvérulent ( $c = 0$ ) chargé par une force d'inclinaison quelconque. Le petit croquis (b) représente le domaine d'équilibre limite d'une fondation superficielle sur un matériau purement cohérent ( $\phi = 0$ ). Le croquis (c) représente le domaine d'équilibre limite d'un pilier ( $\phi \neq 0$ ;  $c \neq 0$ ) soumis à une force en tête d'orientation quelconque. On voit que si ce pilier est proche de la rupture en compression simple, le fait d'ajouter la moindre force horizontale (c'est-à-dire un cisaillement en tête du pilier) fait sortir le système du domaine d'équilibre. Par contre, si la tête du pilier était proche de la rupture sous l'effet d'un cisaillement horizontal, le fait d'ajouter une contrainte normale améliore l'équilibre du pilier, tout au moins si on reste dans certaines limites.

### 3. Comment le problème se pose au laboratoire

En compression simple, après une phase de serrage des fissures naturelles au début du chargement, la courbe effort-déformation présente une partie à peu près rectiligne, à peu près réversible, qui permet de définir une limite élastique. Ensuite, on voit apparaître des déformations non linéaires dont une partie n'est pas réversible et on parle alors de plasticité. Dans les roches

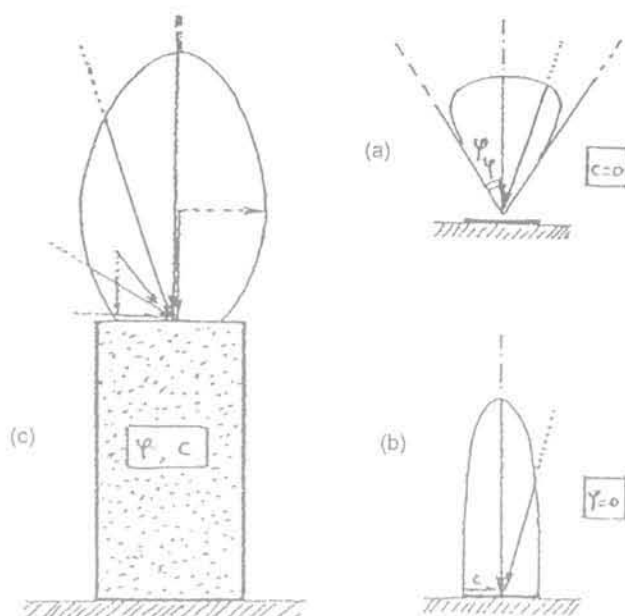


FIG. 2 Domaine d'équilibre d'un pilier. Equilibrium field of a pillar.

à comportement fragile, on entend parfois des craquements et une fissuration nouvelle apparaît, orientée dans la direction de la compression (Fig. 3).

Cette fissuration grandit même à charge constante jusqu'à la rupture différée et ceci est très important pour la modélisation qui doit admettre une variation de volume au cours du fluage. En augmentant encore le chargement la roche casse.

La figure 4 représente une courbe de comment d'une roche en compression simple. Si l'on maintient la force en dessous de la limite élastique, il ne se passe rien. Au-dessus de la limite élastique, il peut y avoir des petites déformations différées qui se stabilisent au bout d'un certain temps (Fig. 4). Encore au-dessus, elles sont plus grandes mais il y a encore stabilisation. Encore au-dessus et en attendant longtemps on aboutit à la rupture. Encore au-dessus on aboutit aussi à la rupture mais plus rapidement. Et, enfin, tout en haut, c'est la rupture instantanée. Il semble que le domaine de stabilité et d'écoulement reste à l'intérieur de la courbe complète de comportement (en pointillés sur la figure 4) pour certaines roches en compression simple.

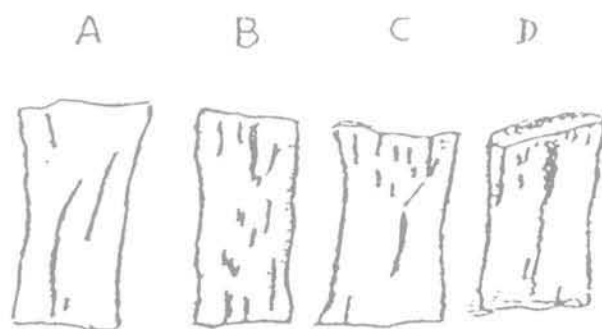
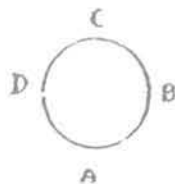


FIG. 3 Dessin de la fissuration d'un matériau fragile. Brittle fissures drawing of a sample.



<sup>23</sup> J. Goguel, *Géologie de l'environnement*, 1980, p. 122.

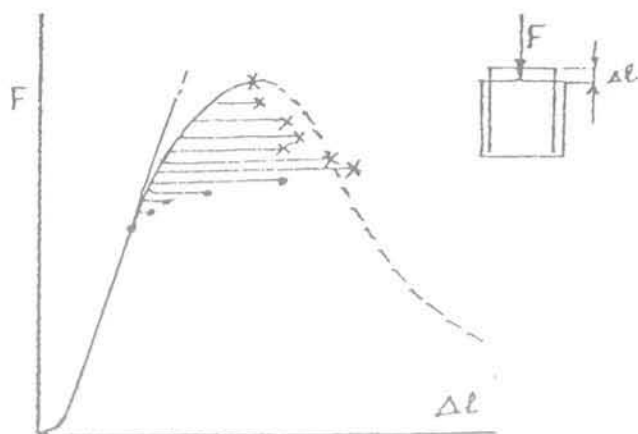


FIG. 4 Comportement d'une roche et effet du temps:  
Force-displacement curve and time effect:  
• Stabilisation après un long temps/Delayed stabilisation  
x Rupture différée/Delayed failure.

Je ne sais pas si c'est valable pour toutes les roches, et certains auteurs ne l'admettent pas<sup>(4)</sup>, et c'est certainement faux pour les sols où le comportement visqueux (viscoplastique par opposition à viscoélastique) peut largement aller au-delà de la frontière du radoucissement.

Mais d'où vient l'effet du temps dans ce fluage et qu'est-ce qui justifie le terme visqueux? On l'attribue à l'agitation thermique autour des défauts en tension où, à certains moments, l'écart entre deux molécules en fond de fissure est devenu suffisamment grand pour qu'elles ne puissent plus se raccrocher. Si cette interprétation est exacte, on peut en inférer que si on augmente la température, c'est-à-dire si on accélère l'agitation thermique, la durée sera plus courte avant que la rupture se produise, et effectivement on sait que la résistance diminue lorsqu'on chauffe une roche, et réciproquement qu'elle augmente quand on la refroidit. On peut citer les travaux de Push sur les aspects micromécaniques des phénomènes de fluage<sup>(5)</sup>.

On vient de citer des défauts et cela entraîne un effet d'échelle, c'est un phénomène bien connu et il n'est pas nécessaire d'insister: la résistance et la dispersion des résistances sont des fonctions décroissantes de la dimension. Ce qui est moins connu par contre, c'est que le comportement varie aussi. Telle quartzite, rigide et fragile sur une petite éprouvette, présente en grande masse un comportement élastoplastique. Et un matériau, dont la matrice a un comportement élastoplastique, va présenter en grande masse du fluage et de la ductilité.

Il faut rappeler maintenant comment on détermine la résistance à la rupture à long terme. La méthode est fort simple. On charge des éprouvettes à 60 %, 80 %, 90 %, 95 % de la résistance à court terme, et tout en mesurant la déformation on attend le temps qu'il faut pour que cela se stabilise ou que cela casse. On remarquera qu'il s'agit d'un essai plus long et donc beaucoup plus coûteux que pour la détermination de la résistance instantanée. Mais surtout, il y a là un handicap méthodologique grave. Du fait de la dispersion de la résistance instantanée, on ne sait pas si le pourcentage de la résistance à court terme correspond bien à celui de chacune des éprouvettes. Si bien que le bel ordre indiqué ci-dessus peut donner expérimentalement un échelonnement des résultats tout différent (l'éprouvette chargée à 90 % cassant, par exemple, avant celle à 95 %). La résistance moyenne à long terme est donc plus incertaine que la résistance moyenne à court terme.

Les craquements que l'on entend pendant le chargement et dont le nombre augmente lorsqu'on approche de la rupture sont certes un phénomène précurseur de la rupture, mais sa précision est insuffisante (Fig. 5).

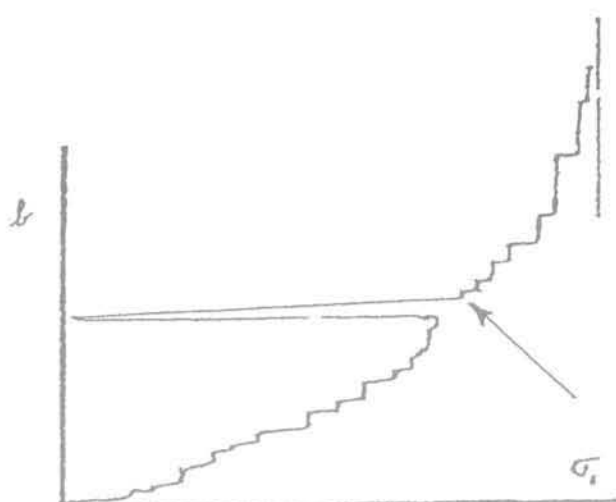


FIG. 5 Écoute des bruits. Nombre de bruits cumulés en fonction de la contrainte: charge, décharge et rechargement (effet Kaiser).  
Number of noises during loading (Kaiser effect).

## 4. Comment se présente la rupture différée dans les cas réels

On va examiner maintenant des situations réelles comme celles qui ont été citées plus haut.

Il est très possible que la résistance à long terme d'un massif rocheux évolue, par exemple en diminuant par vieillissement ou par altération. La rupture différée se produit alors lorsque la résistance à la rupture devient égale aux contraintes appliquées (poids propre, charge apportée par les structures, etc.) (Fig. 6a). C'est tout à fait la configuration des essais de laboratoire où la charge appliquée est facilement rigoureusement constante pendant toute la durée de l'essai.

Mais dans la nature, c'est peut-être la charge qui varie: la mine est de plus en plus exploitée, les structures sont chargées différemment, la nappe change d'altitude, la falaise est minée à sa base par la mer, etc. (Fig. 6b). Ici, il faut citer une expérience en vraie grandeur pilotée par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées<sup>(6)</sup> et publiée récemment. Il s'agissait d'une ancienne carrière de calcaire grossier abandonnée, dont on a chargé le toit sur quatre hectares en plaçant en surface des déblais excédentaires provenant d'un projet routier. Le taux de défructement des piliers variait de 75 à 90 % selon la dimension des piliers et la largeur des galeries; une étude préliminaire avait montré que le risque de ruine induit par la surcharge n'était pas nul. La carrière a été fortement instrumentée; c'était un véritable laboratoire souterrain: vérin plat pour des mesures de contraintes dans les piliers, topographie du toit, déformation des piliers, tassement du sol sous la carrière (argile plastique sous les sables de Cuise), extensomètres hypersensibles de Blum, extensomètres horizontaux, etc.

Les évolutions des contraintes et des déformations en fonction du chargement ont été suivies et ont montré d'une part un affaissement du toit, et d'autre part une augmentation des contraintes dans les piliers (mais assez dispersée); des relevés visuels ont été suivis pendant cinq ans après le chargement et ont montré une progression de l'endommagement dans les piliers et dans le massif: fissuration du toit, chute de plaques du toit, épaufures le long des diaclases ou des coins des piliers, écaillage au niveau des joints. L'évolution n'est pas terminée, mais il n'y a pas eu, jusqu'à présent, de manifestations vers la ruine et simplement des transferts de charge vers les piliers de bord. D'après l'analyse sis-

<sup>(4)</sup> Cristescu, *Rock rheology*, Kluwer Ac. Pub., 1989; et Cristescu, *Time effect in Rock Mechanisms*, Wiley, 1998.

<sup>(5)</sup> R. Pusch, « Mechanisms and consequences of creep in crystalline rock ». *Comprehensive Rock Engineering* (ed. J. Hudson), vol. 1, chapitre 9, 1993, p. 227-241.

<sup>(6)</sup> Potherat P., Alfonsi P., Moiriat D., Thorin R., « Études et suivi instrumental du laboratoire souterrain de Mériel-Villiers-Adam (Val-d'Oise) ». *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° 237, mars-avril 2002, p. 59-75.

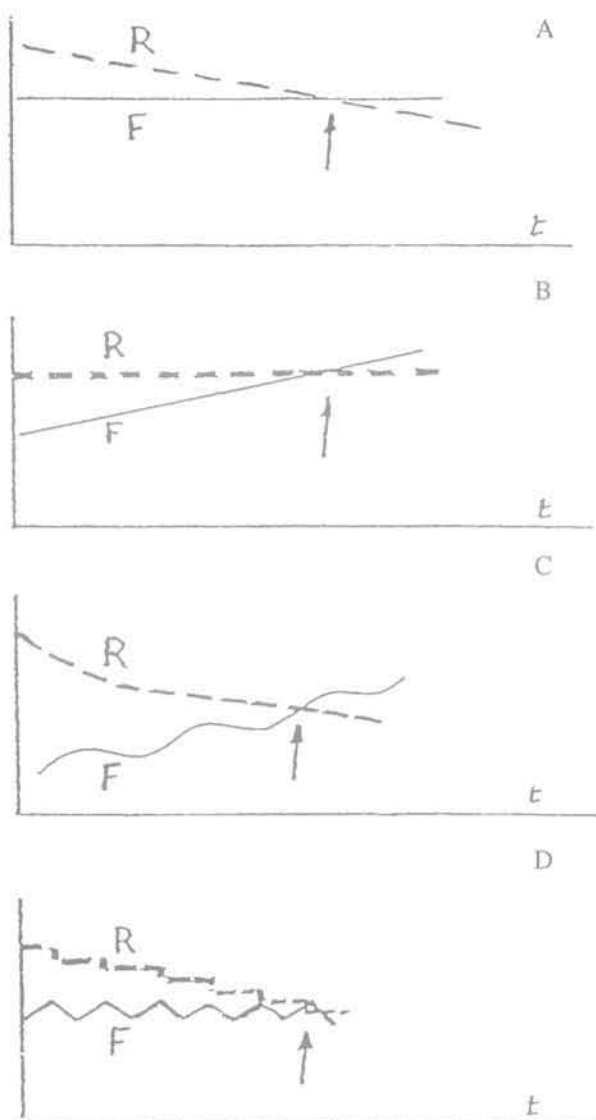


FIG. 6 Résistance R de la roche et sollicitation F en fonction du temps t.  
Rock strength B and stabilisation F with time.

mique, la périphérie d'un pilier est plus endommagée que la partie centrale (1 940 m/s par rapport à 2 340 m/s). L'observation depuis le début porte sur une quinzaine d'années, et le suivi continue.

Pour la rupture différée, en dehors des cas (a) et (b) ci-dessus, il y a aussi la possibilité de la figure 6c où résistances et charges varient ensemble. La figure 6d est une variante de la figure 6c où les sollicitations sont répétées, par exemple par le gel ou par le battement saisonnier de la nappe. Ces forces cycliques peuvent provoquer une dégradation du massif rocheux par fatigue, d'où une diminution de la résistance par petits paliers successifs (la charge ultime, ou résistance à long terme, correspond à un essai de fatigue sous un seul cycle de chargement d'où le nom quelquefois employé de fatigue statique pour désigner la résistance à long terme).

Enfin, il y a une dernière possibilité : la résistance diminue en fonction du temps et les contraintes aussi. C'est le cas de la relaxation, par exemple des contraintes tangentielles autour d'un tun-

nel où, en fonction du temps, on peut écouter et suivre la fissuration qui se développe vers l'intérieur du massif, ce qui entraîne une diminution des contraintes en surface. Il n'est pas impossible qu'un tel phénomène se soit produit dans la carrière citée précédemment car un report des charges des piliers a eu lieu vers les bordures ainsi qu'un élargissement de l'affaissement du toit, les forces de masse restant évidemment constantes. L'étude du milieu, à partir de la vitesse de propagation des ondes, est certainement très utile pour comprendre ce mélange de fluage et de relaxation.

Dans la réalité des travaux ou des situations naturelles, la prévision des effondrements spontanés apparaît donc comme étant très difficile, parce qu'on ne connaît pas ou qu'on ne maîtrise pas tous les paramètres mécaniques ou physiques, c'est-à-dire les paramètres de résistance et ceux des sollicitations. Cependant, malgré l'exemple de la falaise instrumentée de Mesnil-Val où les mesures de topographie et de déformations n'ont pas donné grand-chose, mais aussi grâce à l'exemple de la falaise de Mesnil-Val, où l'écoute des bruits a donné des indices importants dans la dernière journée, il faut rester persuadé que des événements prémonitoires se produisent avant la rupture et qu'une instrumentation correcte devrait permettre de surveiller les évolutions en fonction du temps. L'interprétation est certes difficile mais l'exemple du grand glissement rocheux de Vaïont (300 106 m<sup>3</sup>), où des déplacements métriques se sont produits le 9 octobre 1963 avant la rupture en liaison avec la montée du plan d'eau dans le réservoir d'un grand barrage, montre à la fois que des signaux précurseurs existent et aussi qu'il faut que quelqu'un les connaisse en temps réels, et que lorsqu'un certain seuil, défini à l'avance, est atteint, il puisse donner une alerte à l'autorité qui peut prendre une décision. Ceci est très important et voici deux exemples.

Le premier est celui du capteur de déplacement à cheval sur une fissure, qui indique le mouvement d'un bloc qui menace de tomber par rapport à un autre supposé fixe. Le capteur est relié à une sonnerie à la mairie. Après un déplacement de 1 mm, la sonnerie doit grelotter. Elle sonne un lundi matin ; on monte voir le bloc dangereux et on règle à nouveau le capteur. La sonnerie retentit à nouveau le mardi après-midi ; on remonte voir ; elle sonne à nouveau le vendredi : on débranche la sonnerie. L'autre exemple, c'est la colonne de Nantua. Il s'agit d'un monolithe, à l'avant et détaché d'une falaise calcaire, qui menace des habitations situées au bas du pierrier au pied de la falaise. Une saison, on voit des cailloux clairs à son pied. Ils sont clairs parce qu'ils sont nouveaux, donc tombés récemment, ce qui montre une évolution. La topographie indique d'ailleurs que la colonne a bougé. On décide de l'abattre. Une foreuse est installée sur son toit pour préparer le placement des explosifs. Le mouvement de la colonne continue et l'eau du forage doit y être pour quelque chose. On décide d'accélérer le forage et de travailler aussi de nuit. Le mouvement s'accélère davantage. Enfin, les charges sont en place, la sondeuse et le personnel sont évacués et l'autorisation de tir est demandée. Et, on attend ! Puis la colonne s'effondre toute seule, ce qui d'ailleurs déclenche une partie du tir mais tout se passe bien : pas de victimes. La poussière étant retombée, on voit arriver le messager porteur de l'ordre d'évacuation et de l'autorisation de tir. Il paraît que les témoins étaient un peu pâles.

Donc, il faut des mesures en temps réels. Des limites fixées à l'avance, avec les actions définies elles aussi à l'avance à prendre en cas de dépassement des limites et une autorité chargée d'ordonner l'exécution des actions et par qui.

Mais, quelles mesures ? On n'échappera pas à la topographie ni aux mesures de déplacements. Mais il est certain que du côté du développement de la fissuration, il y aura des informations à recueillir. Pour cela, il y a l'écoute des bruits et sans doute les mesures de propagation *in situ* des ondes sonores et de la variation de la célérité, ou de l'amortissement, ou de la composition spectrale. Je rappelle qu'avant la grande catastrophe de Vaïont (2 000 morts), la vitesse des ondes était de 5 500 m/s dans le massif du Mont Toc, et qu'après elle n'était plus que de 1 900 m/s dans la partie glissée. Entre les deux, il y a certainement des possibilités à exploiter.