

abattage d'une falaise instable en site urbanisé knocking down of an unstable cliff in an urbanized site

R. SCHWARTZMANN, J.-J. TRITSCH

Ingénieurs au groupe Terrains, CERCHAR*

C. LE BOUAR

Chef des exploitations de gypse, S.A.M.C.**

Résumé

En 1981, une falaise calcaire longeant une route départementale et bordant un coteau urbanisé de la région Centre a subitement montré des signes d'instabilité : une masse de tuffeau estimée à 30 000 mètres cubes tendait à glisser le long d'un plan de fracturation pré-existant, et menaçait la route et les maisons sous-jacentes.

Devant la quasi impossibilité de procéder à un renforcement efficace, la décision a été prise d'abattre la partie instable de ce massif à l'explosif, en prenant toutes les précautions nécessaires à la sécurité.

L'effondrement provoqué de la falaise par glissement, puis basculement, a été suivi durant toute sa durée par un dispositif de surveillance (géophones, extensomètres,...) permettant de décomposer assez finement le processus dans ses phases successives.

L'opération a été pilotée par le Département, réalisée par l'entreprise S.A.M.C., (Société Anonyme de Matériel de Construction), contrôlée par le Cerchar, et suivie par le Service des Mines et la Protection Civile.

Abstract

In 1981, a cliff of limestone, bordering a secondary road and located on the skirt of a urbanized hill, suddenly showed signs of evident instability: masses of sandy chalk, valued at 30 000 cm, was tending to glide along a pre-existing fracture plane, and the road and houses were threatened by it.

As it seemed nearly impossible to reinforce the cliff efficiently, responsible services decided to blow up this unstable mass, taking a lot of precautions.

A watching device allowed to examine the process of collapse, during successive stages: sliding then tipping over.

* B.P. N° 2, 60550 Verneuil-en-Halatte.

** Société anonyme de matériels de construction, 21-23, rue des Ardennes, 75940 Paris Cedex 19.

1. INTRODUCTION

En Touraine, la plupart des cours d'eau coulant sensiblement d'Est en Ouest ont creusé leur lit dans les formations calcaires du Crétacé supérieur. Ils ont ainsi souvent déterminé des fronts de falaise plus ou moins hauts, et toujours potentiellement instables, en raison de la médiocrité des caractéristiques géomécaniques de la roche ainsi mise à nu.

De longue date, les meilleurs bancs de ce massif calcaire ont été exploités comme source de pierre à bâtir, de sorte qu'actuellement de nombreux réseaux de galeries plus ou moins denses sous-minent ces fronts de falaise. Ces vides sont parfois abandonnés, mais le plus souvent, ils sont réutilisés comme habitations troglodytiques, comme caves à vin, et surtout comme champignonnières.

2. MANIFESTATIONS DE L'INSTABILITÉ DU MASSIF

En décembre 1980, un champignonniste occupant une ancienne carrière souterraine sur le territoire de la commune des Roches-Lévêque (Loir-et-Cher) constatait qu'une grande fracture verticale, et sensiblement parallèle au front de falaise qui bordait son exploitation, semblait montrer des signes d'évolution. Cette fracture, connue depuis longtemps, affectait l'entrée de la champignonnière selon le schéma de la figure 1. Elle n'avait jusque-là jamais inquiété l'exploitant.

Appelé en consultation sur les lieux, le CERCHAR identifiait la discontinuité comme une fracture mécanique ancienne, et reconnaissait soigneusement son extension, grâce notamment à une série de petites chambres creusées en culs-de-sac tout au long de la falaise. Sept points de surveillance étaient alors choisis et équipés de témoins de plâtre (fig. 2).

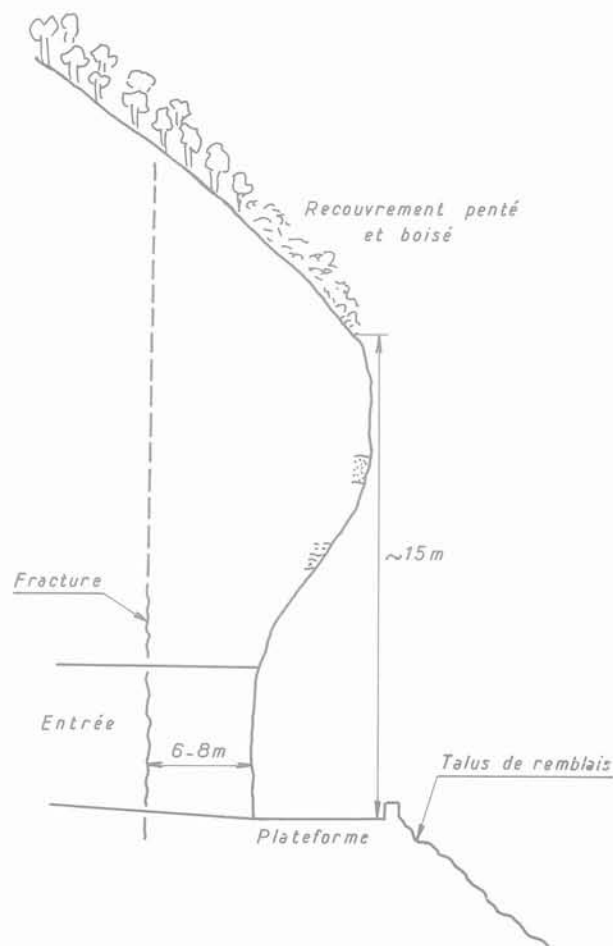


Fig. 1. — Profil de l'entrée de la champignonnière de R.

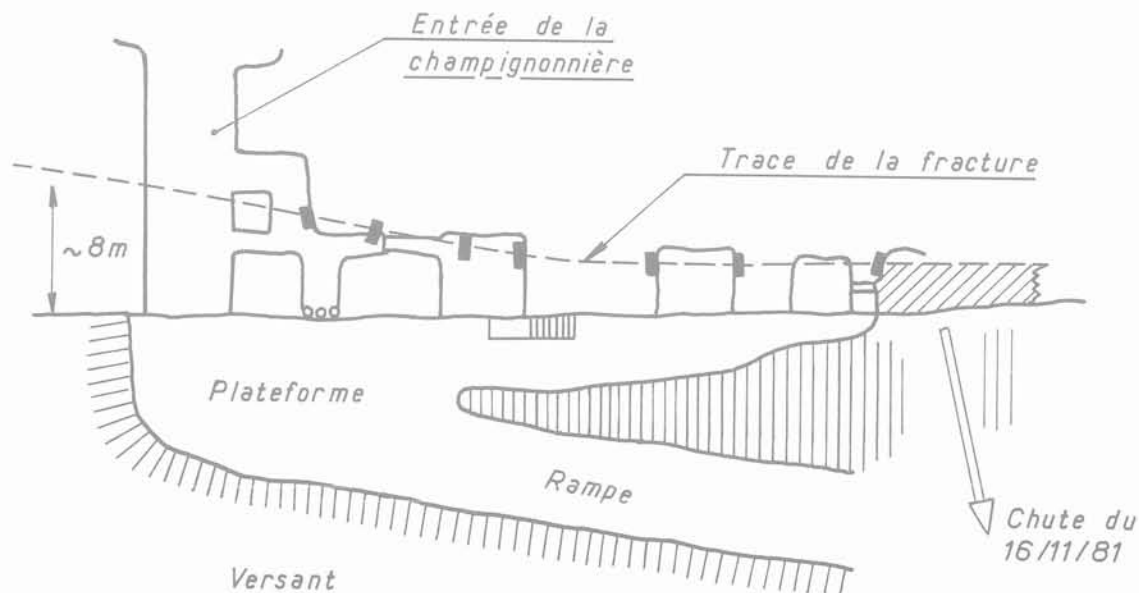


Fig. 2. — Trace de la fracture et position des points de mesure.



Fig. 3. — Vue du front de falaise pris depuis l'entrée de la champignonnière. On note le surplomb important et les diverses entrées de galeries.

En novembre 1981, après qu'un seul des témoins se fut rompu (mais plusieurs autres, mal posés, s'étaient probablement décollés du massif), une masse d'environ 200 tonnes de rocher se détachait de la pointe la plus mince de l'éperon prédécoupé par la fracture, frôlait une maison, et venait s'arrêter au bord de la route départementale située en contrebas. Les figures 3 et 4 donnent un aperçu de l'état de la falaise à cette époque.

L'affaire était alors prise en charge par la Sous-Préfecture locale qui demandait l'aide du CERCHAR pour évaluer le danger présenté par la falaise et envisager une solution appropriée. Il importait, en effet, de savoir si l'éboulement en question marquait un terme à l'évolution défavorable de la masse rocheuse ou si, au contraire, cet incident ne constituait qu'un épisode d'un processus d'instabilité en cours d'évolution et laissait présager d'autres désordres du même type.

A l'issue d'une réunion de travail rassemblant des représentants du Département, de la commune des Roches-Lévéque, du Service des Mines, du propriétaire de la champignonnière de la Protection Civile et du CERCHAR, la ligne de conduite suivante était adoptée :

1. Ediction par la Préfecture d'un arrêté de péril imminent prescrivant l'évacuation immédiate des deux maisons situées en contrebas de la section de falaise affectée par la fracture.
2. Mise en place d'une surveillance au moyen d'un ensemble de neuf extensomètres relevés avec une fréquence hebdomadaire par la Protection Civile



Fig. 4. — Vue d'ensemble du front de falaise. L'entrée de la champignonnière est à l'extrême gauche. A droite, on aperçoit en clair l'emplacement du prisme qui s'est décroché en novembre 1981.

(Corps des pompiers), les résultats étant transmis par téléphone au CERCHAR et immédiatement analysés.

3. Décision définitive sur la conduite à tenir après trois mois de surveillance.

3. SURVEILLANCE DE LA FRACTURE

3.1. Nature des mesures effectuées

Neuf bases extensométriques étaient mises en place tout au long de la falaise selon le schéma de la figure 5. Chacune de ces bases était constituée d'une paire de plots, distants de 200 mm, et scellés de part et d'autre des lèvres de la fracture. L'écartement des plots, dans une direction perpendiculaire au plan de fracturation, était mesuré à l'aide d'un extensomètre fournissant des mesures avec une précision effective de 0,01 mm, à condition que certaines précautions élémentaires aient été prises, en particulier vis-à-vis des variations de température. A cet effet, deux des neuf bases de mesures étaient implantées dans du matériau continu et servaient de référence pour apporter les corrections éventuellement nécessaires. Parallèlement, les températures étaient notées lors de chaque relevé des mesures.

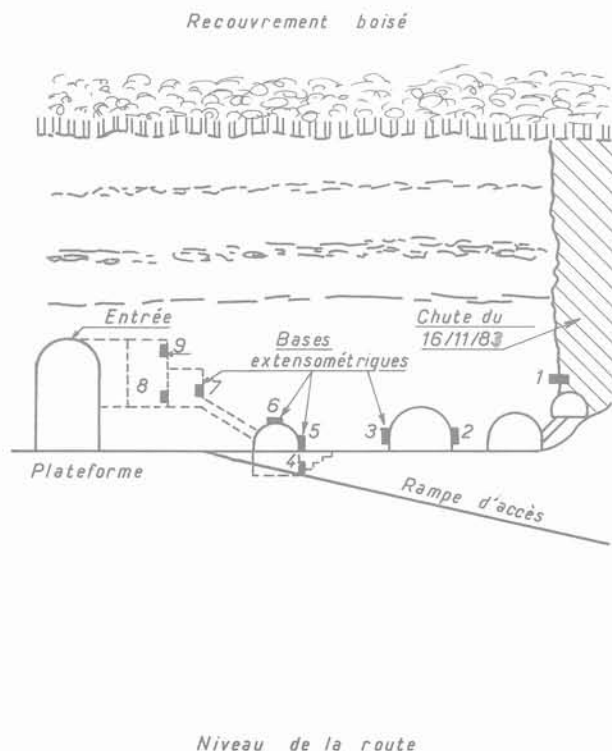


Fig. 5. — Situation des neuf bases extensométriques.

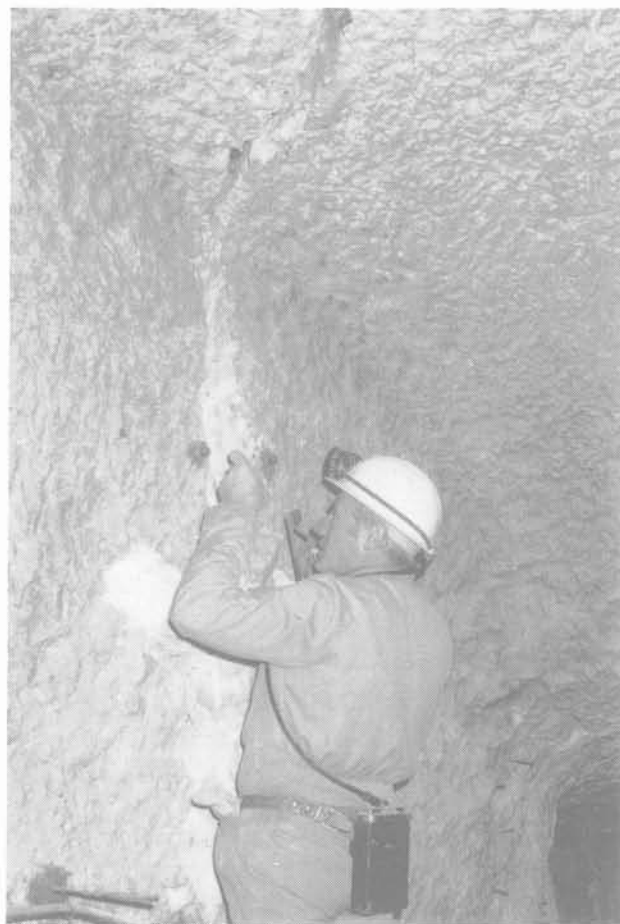


Fig. 6. — Installation d'une base extensométrique.

Les figures 6 et 7 montrent respectivement la mise en place d'une base de mesures et son aspect final.



Fig. 7. — Base extensométrique se substituant à un témoin de plâtre.

3.2. Résultats des mesures

L'évolution des mesures d'écartement des plots relatifs aux sept bases actives et pour toute la période de surveillance apparaît sur la figure 8. Outre une mise en évidence d'un net mouvement d'ouverture de la fracture, l'analyse des déformations mesurées permettait de noter :

— une homogénéité satisfaisante de l'allure des sept courbes traduisant une augmentation systématique de l'ouverture de la fracture ;

— une évolution grossièrement linéaire des déformations ; une analyse plus fine montrait toutefois que les périodes d'accélération des mouvements avaient coïncidé avec les périodes de baisse de la température (vers les 3^e, 25^e et 65^e jours), les périodes de forte remontée de la température (35^e et 75^e jours en particulier) se traduisant, au contraire, par un amortissement très net, voire un très léger resserrement de la fracture. Mieux connu par ses manifestations que par ses causes exactes, ce phénomène de « respiration » de fractures, lié aux conditions atmosphériques, est assez classique puisqu'on peut même l'observer occasionnel-

lement sur les fractures affectant les monuments historiques ;

— une « oscillation » très faible de la falaise : sur les bases 1 et 2, voisines de la partie tombée en novembre 81, les mouvements étaient très forts au début de la période de surveillance, puis s'étaient atténués ensuite. Le phénomène inverse avait affecté la base n° 7 située près de l'entrée de la champignonnière.

Ces résultats montraient donc que, depuis l'éboulement partiel intervenu en novembre 1981, la falaise continuait à bouger et qu'un volume de roche qu'on pouvait estimer à 20 ou 30 000 mètres cubes se détachait lentement du massif en place. Le mouvement d'ensemble se manifestait avec une vitesse régulière variant, selon les points de mesure, de 0,5 à 1 millimètre par trimestre, soit 2 à 4 millimètres par an.

A l'échelle des mouvements observés au niveau des masses rocheuses instables, ces vitesses étaient très importantes et laissaient présager d'autres désordres à brève échéance. Il apparaissait donc que les mesures de protection envisagées, quelle qu'en soit la nature, devaient intervenir dans les meilleurs délais.

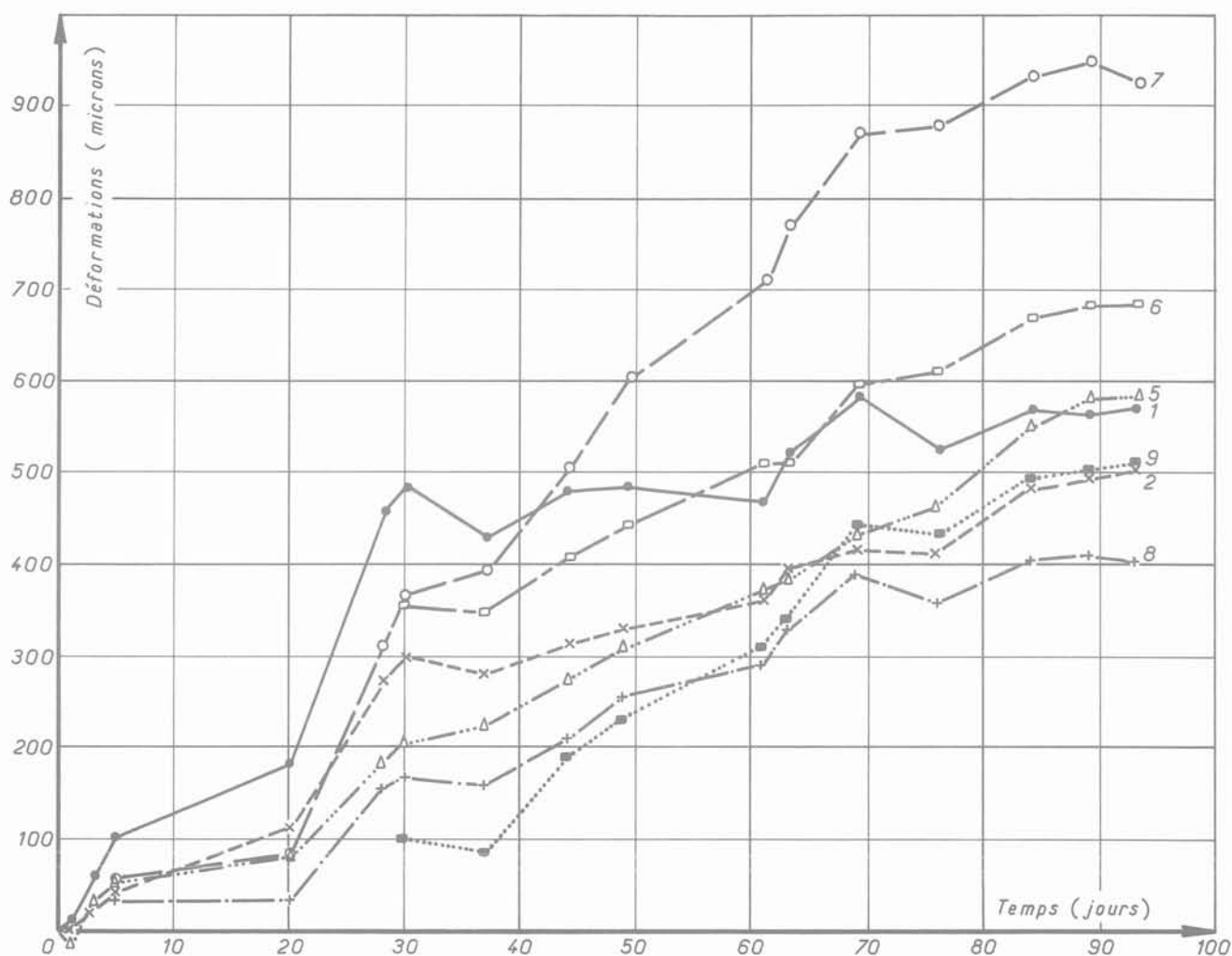


Fig. 8. — Evolutions des mesures d'ouverture de la fracture.

4. MODE DE TRAITEMENT RETENU

La solution du confortement présentait de grandes difficultés techniques :

— la mise en place d'un soutènement maçonné ne pouvait se faire qu'après déblaiement d'un important talus de remblais et dégagement de la rampe d'accès, de façon à pouvoir trouver une assise ferme. Il aurait donc fallu dégager préalablement plusieurs milliers de mètres cube de remblais et, peut-être, augmenter ainsi les risques d'instabilité du massif durant la phase préparatoire ;

— le confortement par mise en place de tirants ancrés au-delà de la fracture et perpendiculairement à celle-ci se heurtait au problème d'accès au front de falaise à des fins de purgeage, puis de mise en place de ces tirants. En outre, la très médiocre qualité du matériau et la présence de grosses poches d'argile et de très nombreux cherts siliceux en bancs irréguliers au sein de la matrice crayeuse laissaient prévoir de sérieuses difficultés de foration et de tenue des ancrages.

Plus définitive et trois fois moins coûteuse, la solution de l'abattage nécessitait quant à elle une maîtrise rigoureuse des opérations à tous les stades du processus : préparation, réalisation, contrôle des résultats. Ce fut elle qui fut choisie et la conduite des travaux fut confiée à S.A.M.C. qui avait présenté un projet d'abattage bien structuré. En liaison avec la Sous-Préfecture locale, le Service des Mines avait pour mission de coordonner les différentes phases de l'opération en veillant au respect des règles de sécurité.

Le projet consistait à abattre la partie dangereuse de la falaise et à réaliser, en arrière de la grande fracture, un nouveau front plus stable obtenu par prédécoupage.

L'instabilité manifeste de la masse rocheuse à abattre ne laissait que peu d'espoir de sauver une des maisons situées en contrebas (maison A, figure 10). Il fut cependant décidé de tenter le sauvetage en prévoyant un abattage par tranches successives, perpendiculaire au plan de la falaise, démarrant à l'aplomb de l'entrée de la champignonnière et progressant vers le Nord de façon à orienter les projections dues au tir vers le Sud et non vers la route. Après établissement par terrassement d'une plateforme de travail en sommet de falaise et en arrière du plan de fracture, les différents coups de mine étaient forés au marteau fond-de-trou en $\varnothing$ 82 mm et tubés en $\varnothing$ 69/75 mm. La figure 9 donne un aperçu du schéma de foration adopté :

— une ligne parallèle à la falaise de mines de prédécoupage, longues de 17 à 25 mètres, pentées à 65 degrés, espacées de 0,70 mètre et délimitant le volume à abattre ;

— des mines d'abattage longues de 12 à 25 mètres, inclinées en éventail de 45 à 65 degrés dans des plans perpendiculaires au plan de prédécoupage.

Le minage étant réalisé avec des explosifs nitrés (nitrate-fuel et N4OR) avec une charge maximum de 25 kg par coup de mine et par détonateur électrique à micro-retard, le prédécoupage étant tiré par tronçons correspondant aux volumes de chacun des 11 tirs d'abattage prévus.

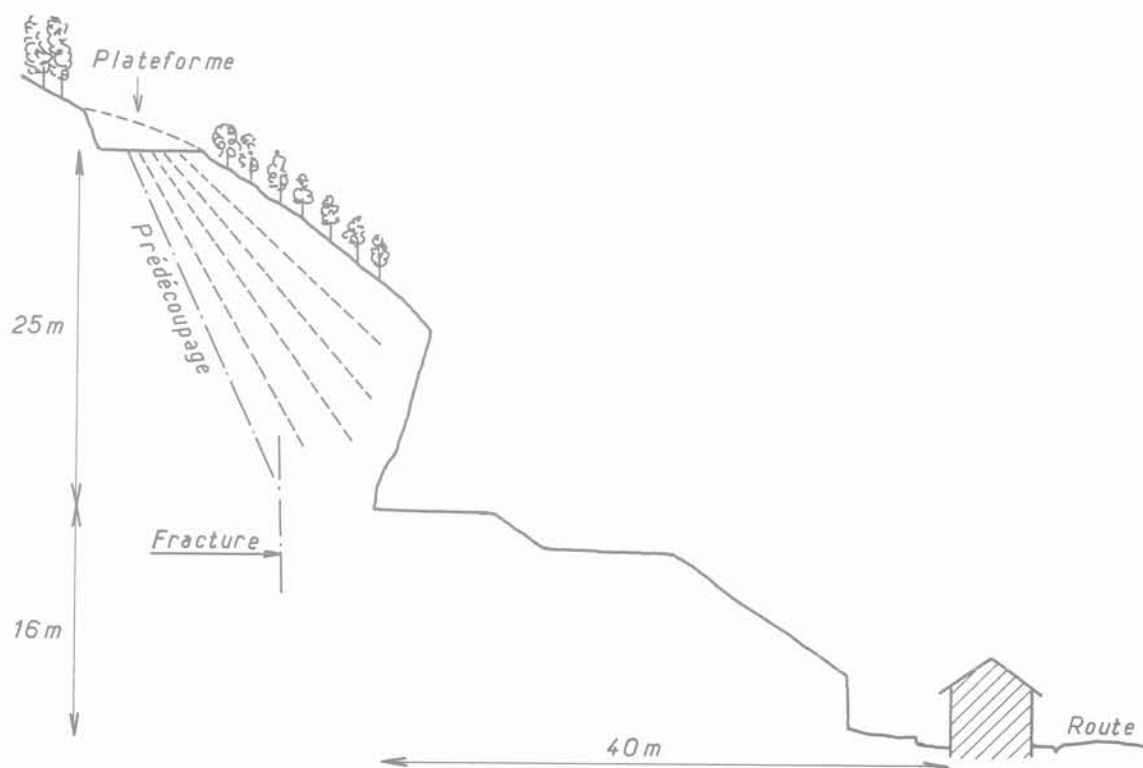


Fig. 9. — Profil moyen de la falaise et du plan de foration.

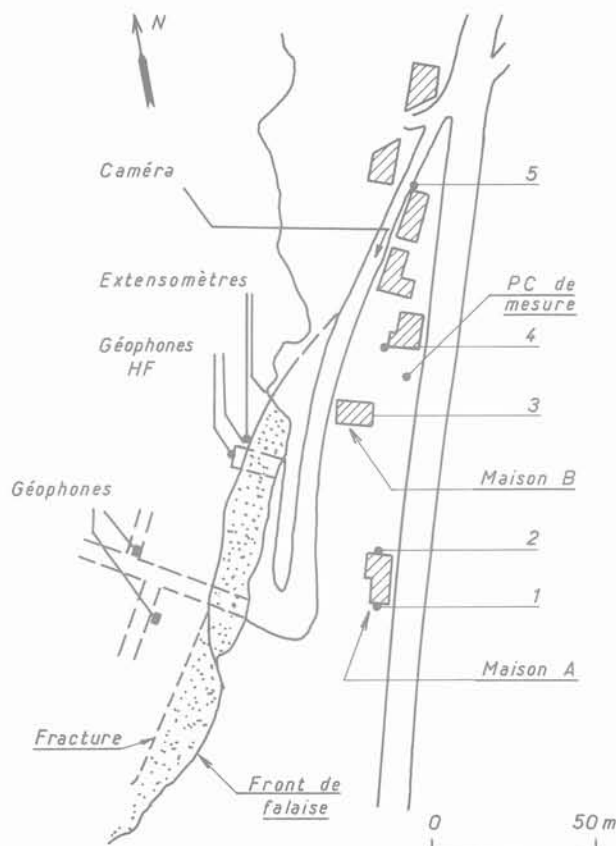


Fig. 10. — Moyens de contrôle mis en place.

5. MOYENS DE CONTRÔLE MIS EN PLACE

La situation des différents éléments du dispositif de contrôle apparaît sur la figure 10. Ce dispositif avait un double objectif :

a. s'assurer que les vibrations engendrées par le tir restaient dans des limites acceptables au niveau des structures concernées (chaussée, maisons, champignonnière). A cet effet, sept bases de mesures de ces vibrations étaient mises en place en divers points du site. Chacune de ces bases était composée d'un ensemble de trois géophones disposés selon trois directions orthogonales. Selon le type d'appareil choisi, la courbe de réponse de ces géophones était linéaire à partir de 2 Hz, de 4,5 Hz, ou de 12 Hz ;

b. recueillir le maximum d'informations sur le processus de ruine de la falaise, au cas où le premier tir déclencherait l'effondrement total de la masse instable. Ce dernier rôle était notamment assuré par une caméra fonctionnant à 100 images/seconde, et par deux extensomètres ancrés de part et d'autre des lèvres de la grande fracture.

6. MÉCANISME DE LA RUPTURE

Mettant en œuvre 400 kilogrammes d'explosif, le premier des onze tirs d'abattage prévus avait lieu le 5 novembre 1982, à 14 h 05. Il avait pour effet de dégager, comme prévu, l'entrée de la champignonnière, mais également de provoquer, avec une vingtaine de secondes de décalage, l'écroulement de toute la tranche de falaise prédécoupée par la grande fracture sub-v verticale, soit une masse de rocher estimée à près de 20 000 tonnes. La maison B était épargnée, mais la maison A était détruite, et la route obstruée par les éboulis.

Ce phénomène justifiait, a posteriori, le pessimisme du diagnostic porté sur l'état de la falaise et la mise en place d'un dispositif de contrôle permettant de suivre, dans tous ses détails, le déroulement du tir.

Globalement, l'écroulement de la falaise s'était déroulé en deux temps, comme l'indique le schéma de la figure 11 :

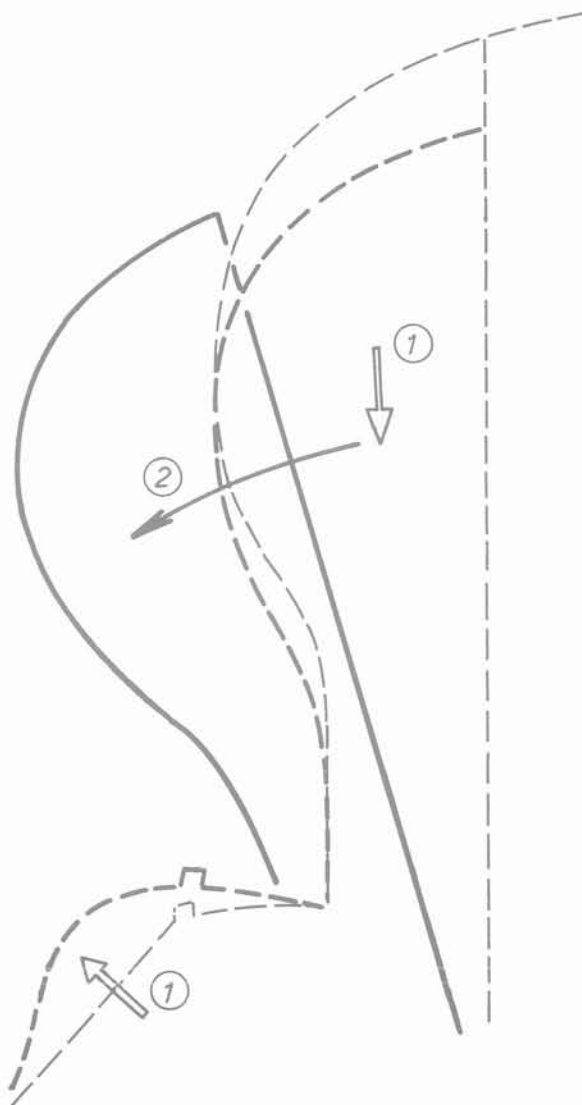


Fig. 11. — Chute de la falaise.



*Fig. 12. — Les débris de la falaise
vus depuis le sommet du tas d'éboulis.
Noter le volume important de certains blocs.*

a. Tassement de la falaise sur elle-même (10 secondes après le top-tir, phénomène très sensible sur le film au ralenti) avec apparition simultanée de bourrelets dans les remblais de pied constituant la rampe d'accès.

b. Basculement massif du front de falaise une seconde plus tard, avec rupture (également très sensible sur le film) en cours de chute selon des plans verticaux sensiblement perpendiculaires au front de falaise.

Le tassement initial peut s'expliquer par l'existence, au niveau de la route, d'anciennes caves masquées par les remblais constituant la rampe d'accès et mises à jour ultérieurement, lors des travaux de déblaiement. Ces caves se seraient alors écrasées par suite de l'étroitesse du massif délimité par la fracture (effet de poinçon).

Dans le détail, le processus de ruine a pu être continuellement suivi comme le montre la séquence chronologique suivante qui regroupe l'essentiel des données enregistrées sur les divers appareils de contrôle.

Cet ensemble d'enregistrements a eu, en particulier, le mérite de déceler quelques signes avertisseurs de la rupture: démarrage des mouvements au niveau du plan de fracture détecté par les deux extensomètres, et émissions brèves de vibrations à haute fréquence (supérieure à 100 Hz) au sein du massif sans qu'on puisse toutefois localiser exactement la source de ces émissions.

Les figures 12 et 13 montrent l'aspect des éboulis quelques jours après le tir.



*Fig. 13. — Les mêmes débris, vus de la route.
La maison B est à droite.*

Chronologie des observations

Temps (secondes)	SOUTHERN	SCHLUMBERGER	BRYANS	CAMERA
	- 3 bases 4,5 Hz sur les maisons - 2 bases 14 Hz sous la falaise	- 2 bases 2 Hz dans la falaise à 150 et 190 m	- 2 accéléromètres dans la falaise à 150 m - 2 extensomètres sur plan de rupture	16 mm couleur V = 100 i/s
0	Top tir Premières ondes de tir		Mouvement de qq mm (traction) sur les exten- somètres	
0,5	Amortissement des ondes de tir		Amortissement des mouvements	
2,0				Top caméra
4,5	Fin des ondes visibles sur points 1 et 2			
10,5	Chute des blocs résultant du tir		Lentee accélération des mouvements	
18,3	Secousses HF sur G.14 Hz			
19,0		Vibrations faible sur G.2 Hz		Début tassement de la falaise
20,0	Secousses HF sur G.14 Hz		Déformations brutales ↗ ∞ rupture des câbles	Début basculement de la falaise
25,5	Premières vibrations sur G.4,5 Hz			
25,6		Premières vibrations sur G.2 Hz		Arrivée au sol
26,5	Destruction des bases 1 et 2			



Fig. 14. — Un des derniers tirs d'abattage du surplomb au-dessus de la maison B.

7. POURSUITE DES TRAVAUX

L'effondrement consécutif au premier tir avait créé une nouvelle façade sub-verticale présentant encore quelques surplombs marqués. L'objectif d'obtenir un front stable, incliné vers l'arrière par prédécoupage était maintenu et, après révision du plan de foration pour prendre en compte la nouvelle géométrie du volume de roches restant à abattre, huit tirs étaient réalisés de décembre 82 à février 83, dans d'excellentes conditions de sécurité, jusqu'au voisinage immédiat de la maison B où se situait encore un surplomb très important. La figure 14 montre la situation du site en février 83.

A cette époque, la découverte d'une nouvelle fracture dans une cavité d'accès difficile, située à 20 mètres en arrière et à 25 mètres au-dessus de cette maison B, faisait momentanément craindre le risque d'un nouvel effondrement. Après réflexion, cette dernière partie de la falaise était abattue en juin 84 par des tirs très réduits de torpillage du pied du surplomb qui n'occasionnèrent aucun dégât à la construction.

Finalement, le front de falaise était purgé à partir d'une grue à flèche de 25 mètres. Il ne présente plus actuellement de risque d'éboulement.

8. CONCLUSIONS

L'histoire de la falaise des Roches-L'Evêque et de son abattage est intéressante à plusieurs égards. Elle illustre d'abord parfaitement le type de danger présenté par les falaises à front régressif qui bordent la plupart des vallées de la région Centre: apparemment stables

pendant des décennies, elles peuvent se mettre à évoluer rapidement jusqu'à la ruine sans qu'une origine précise de cette accélération puisse être toujours clairement établie.

En ce qui concerne les aspects techniques de la surveillance, la précision et la fiabilité des mesures extensométriques permettent maintenant, dans des conditions parfois sévères, de surveiller et de porter un diagnostic à la fois rapide et sérieusement fondé sur l'évolution probable de tels massifs.

Sur le plan de la typologie de l'écroulement de falaise enfin, les moyens de contrôle mis en place à l'occasion de cette opération ont permis de mettre clairement en évidence les différentes phases d'un processus-type: le basculement.

BIBLIOGRAPHIE

- J. DELAUNAY, 1977 — *Principe d'une étude des risques liés aux mouvements du sol et du sous-sol. Typologie des mouvements et pathologies des terrains en Touraine*. Thèse C.N.A.M., Paris, pp. 185-204.
- J.C. YVARD, 1984 — *Pluviosité et écroulements des falaises du Val-de-Loire*. Communication au colloque «Mouvements des terrains», Caen, mars 84.
- R. SCHWARTZMANN, 1980 — *Surveillance et analyse de l'évolution des fractures affectant les monuments historiques*. Le Moniteur des Travaux Publics et des bâtiments, n° 31, Paris, pp. 39-41.
- M. PANET et J.-P. ROTHEVAL, 1976 — *Stabilité des masses rocheuses. La mécanique des roches appliquée aux ouvrages du Génie Civil*. Document de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, pp. 109-110.