

un nouveau modèle de calcul de trajectoires de blocs rocheux

a new model of calculation for the trajectories of rocky blocks

J.L. FALCETTA

B.R.G.M. Ateliers risques naturels et aménagement en montagne.

(Service géologique régional Rhône-Alpes)*

E.C.L. Laboratoire de Mécanique des Sols**

Résumé

Dans la prévention des risques de chutes de masses rocheuses instables, il y a essentiellement quatre niveaux d'intervention: le dépistage, le diagnostic, l'évaluation du risque et les travaux de protection. Le présent article traite particulièrement de l'évaluation du risque. On propose un modèle original de prévision des trajectoires prenant en compte la forme du bloc, ses dimensions et ses vitesses initiales de translation et de rotation. Le cas de la falaise de Montagny, en Savoie, et celui de la falaise du «Grand Château» au Nord de Bonneville, en Haute-Savoie, montrent l'intérêt d'un tel modèle.

Abstract

To prevent risks of rockfalls, there are essentially four steps of intervention: the localization, the diagnosis, the estimate of risks and the protection works. The paper only deals with the estimate of risks. We propose an original model to forecast trajectories using the form of the block, its dimensions and its initial translation and rotation velocities. The examples of the cliffs of Montagny (Savoie) and «Grand Château» (North of Bonneville, Haute-Savoie), show the interest of the model.

1. INTRODUCTION

Des écroulements de blocs ou de pans de falaise se produisent souvent en zone montagneuse.

Dans les rares cas où les masses de terrain concernées sont très grandes, au-delà de quelques milliers de tonnes, les mécanismes qui régissent leurs déplacements après rupture sont très complexes. En dehors de bilans énergétiques globaux, aucune formulation satisfaisante n'a encore été dégagée et, faute d'être en mesure de prévoir, l'homme reste sans défense.

Dans les cas, plus fréquents, où les masses susceptibles de se rompre reviennent à l'échelle humaine, de quelques tonnes à quelques milliers de tonnes, la

situation est heureusement différente: la compréhension des mécanismes est plus facile, les diagnostics plus sûrs, la prévision et l'intervention possibles.

Mandaté par des collectivités locales, la Direction de la Protection Civile ou, plus récemment, le Haut Commissariat aux Risques Naturels Majeurs, le Bureau de Recherches Géologiques et Minières a eu, depuis une quinzaine d'années, de nombreuses occasions d'intervenir, face à ce type de problèmes, dans les régions montagneuses de France. L'expérience ainsi accumulée permet de discerner quatre principaux niveaux d'intervention:

* 29, boulevard du 11 novembre 1918, 69604 Villeurbanne Cedex.

** 36, avenue Guy-de-Collongue, 69130 Ecully.

— *Le dépistage systématique*, qui relève de l'analyse de cas vécus, du recueil de données, de la mise en évidence de facteurs régionaux ou locaux d'instabilité, et de la synthèse cartographique des résultats.

— *Le diagnostic d'instabilité*, qui doit permettre d'identifier géométriquement, structurellement et mécaniquement une masse instable et de caractériser le mode de rupture possible, ainsi que les principaux paramètres susceptibles d'agir sur l'équilibre.

— *L'évaluation du risque encouru*, qui consiste en :

- une appréciation et une surveillance de l'évolution possible des facteurs d'équilibre;
- une détermination de l'extension des zones exposées;
- une détermination de la valeur des zones exposées.

— *L'inventaire des actions envisageables* :

- techniquement: amélioration de l'équilibre par confortement, ou limitation du risque par édification d'un ouvrage de protection ou évacuation des zones exposées;
- juridiquement ou économiquement.

Des progrès notables ont été faits ces dernières années à chacun des niveaux d'intervention distingués ci-dessus. Ces projets consistent, en particulier en ce qui concerne le troisième d'entre eux, en la mise au point de modèles permettant de prévoir la trajectoire des blocs rocheux. C'est l'un de ces modèles qui est présenté dans cet article.

2. PRÉVISION DE L'EXTENSION DES ZONES EXPOSÉES

2.1. Les modèles de trajectoires existants

En ce qui concerne l'extension des zones exposées, diverses méthodes de prévision, basées sur le calcul des trajectoires de blocs, ont déjà été proposées.

Ces calculs sont faits à deux dimensions, mais leur extension à trois dimensions ne semble pas poser un problème insurmontable. Les véritables difficultés résident particulièrement dans l'appréciation de la vitesse initiale des blocs et dans la modélisation des problèmes de chocs, de rebondissement et de fracturation.

AZIMI et al. (1982) caractérisent le rebondissement sur le versant par deux facteurs aléatoires de réduction d'énergie, en insistant sur le fait que cette réduction est liée à trois phénomènes: la déformation plastique du bloc et du sol, l'émission d'énergie dans le sol sous forme d'ondes élastiques, et la transformation en énergie de rotation d'une partie de l'énergie de translation.

Etant donné leur caractère aléatoire, les coefficients en question sont déterminés à partir de la rétro-analyse d'événements vécus. Pour tenir compte de ce caractère aléatoire, les auteurs sont amenés à définir des plages

de variations des paramètres utilisés et à en faire une exploitation statistique.

Comme les auteurs précédents, C. LOPEZ-CARRERAS (1981) décrit un modèle qui prend en compte le mouvement du centre de gravité du bloc, supposé sphérique, mais qui distingue les phases de roulement, de glissement et de rebondissement, et les mécanismes correspondants.

MELY et PALETTE (1982) proposent un modèle simplifié mais où le bloc a un volume assimilé, à deux dimensions, à un cercle, ce qui permet une première prise en compte de l'énergie de rotation par l'utilisation d'une théorie du choc.

PITEAU et CLAYTON (1978) proposent un modèle assez semblable à celui d'AZIMI.

HACAR, BOLLO et HACAR (1977) étudient l'influence de la force centrifuge agissant sur le bloc lorsque celui-ci roule ou glisse le long d'un versant représenté par une suite de segments de droite ou d'arcs de cercle.

Toutes ces méthodes se heurtent à la même difficulté: si la trajectoire aérienne des blocs est relativement facile à calculer, les phénomènes de contact restent décrits d'une façon purement empirique.

2.2. Le nouveau modèle

Le modèle proposé ici s'affranchit de la plupart des hypothèses simplificatrices retenues jusqu'alors.

Il s'inspire des travaux de CUNDALL (1971) qui a mis au point, pour apprécier le comportement d'un empilement de blocs rocheux soumis à un système de forces quelconques, un algorithme liant de façon incrémentale le déplacement des blocs aux forces agissantes (fig. 1). Le mouvement du bloc est régi par les équations générales de la dynamique:

$$\Sigma F_x = m \cdot \ddot{x}_G, \quad \Sigma F_y = m \cdot \ddot{y}_G \quad \text{et} \quad \Sigma M = I \ddot{\theta}.$$

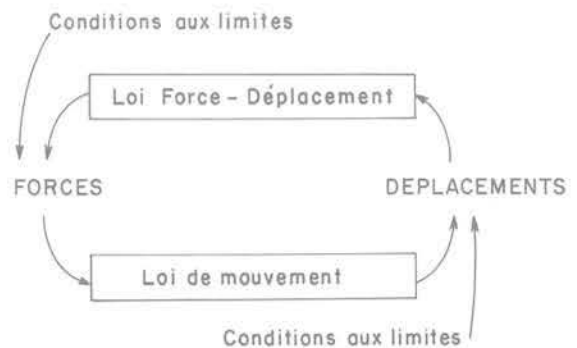


Fig. 1. — Représentation schématique de l'algorithme de Cundall.

L'intégration de ces trois opérations, sur des incréments de temps choisis suffisamment petits, permet de définir le mouvement du bloc, supposé indéformable et rigide, si l'on connaît les valeurs de ΣF_x , ΣF_y et ΣM appliquées.

Une telle approche présente quelques avantages essentiels :

— Le bloc est considéré sous sa forme réelle, avec son inertie et pas seulement à travers le mouvement de son centre de gravité. On verra notamment, plus loin, que cela permet de vérifier une observation fréquente: la forme du bloc influence beaucoup sa cinématique, et en particulier la longueur de sa trajectoire.

— Les lois force-déplacement, notamment au moment du contact, ne sont pas figées, ce qui permet de les affiner progressivement pour mieux rendre compte du phénomène réel.

— Le schéma de calcul est unique, quel que soit le type de mouvement du bloc (glissement, roulement ou rebondissement), et la position de celui-ci est calculée pas à pas.

Les hypothèses actuellement prises en compte sont les suivantes :

— Le bloc est représenté par un polygone défini par les coordonnées de ses sommets.

— Le profil du versant est représenté par une succession de segments de droite définis par les coordonnées de leurs points d'intersection. Ce profil peut être plan ou gauche, pour rendre compte des directions des trajectoires les plus probables en fonction de la morphologie du versant.

— Le bloc est supposé homogène, rigide, indéformable. Dans sa version actuelle, la fracturation n'est pas prise en compte. Toutefois, une recherche (WAN SAI CHEONG - 1983) a été menée sur la propagation des ondes de fracturation au moment du choc, due aux efforts engendrés par celui-ci et que le modèle permet de calculer, moyennant certaines hypothèses sur le comportement du sol support.

— Lorsqu'il n'y a pas de contact, le bloc évolue en chute libre et la résistance de l'air est négligée.

Au moment du contact, les lois force-déplacement sont introduites de la façon suivante : le programme détermine pour chaque incrément de temps les points de contact bloc-profil. Deux cas peuvent se produire :

- le bloc glisse sans rouler sur le versant
- Le contact bloc-versant est un contact plan-plan.
- Le vecteur vitesse présente une direction située hors du cône de frottement.
- La rotation du bloc est nulle (fig. 2).

Dans ce cas, le bloc subit une accélération due à la pesanteur, fonction de l'inclinaison de la pente et du coefficient de frottement attribué au segment du profil sur lequel il évolue. Ce coefficient tient compte de la nature du terrain, de la rugosité des surfaces en contact et de la densité de la végétation.

- le bloc s'enfonce dans le versant
- Le contact bloc-versant est quelconque (plan-plan ou plan-sommet).
- la vitesse est située dans le cône de frottement.

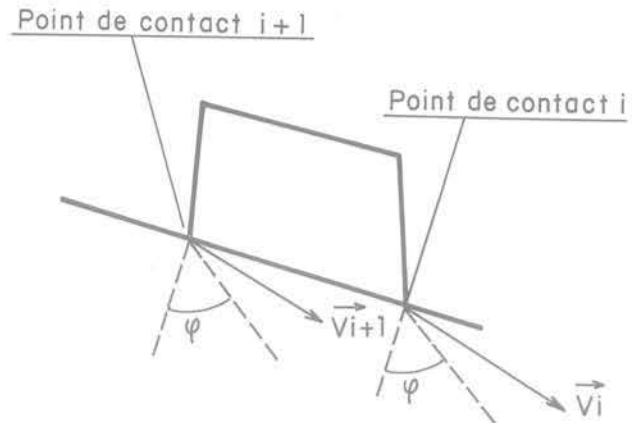


Fig. 2. — Le bloc glisse parfaitement.

Le bloc avance sur le versant suivant une incidence qui se traduira par un enfoncement d'une de ses facettes ou d'une de ses arêtes (fig. 3).

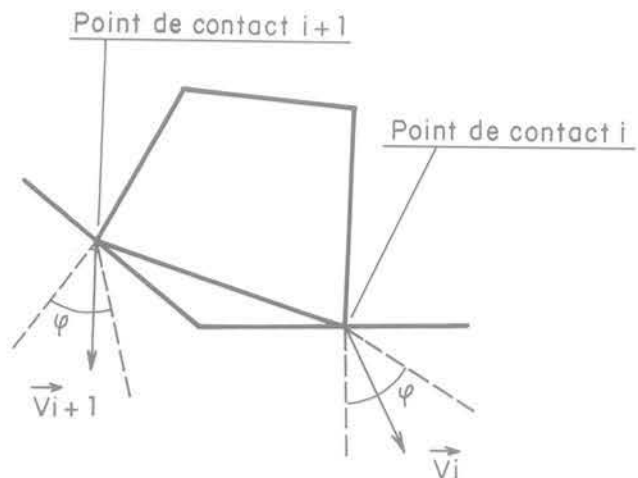


Fig. 3. — Le bloc s'enfonce dans le versant.

Dans cette première approche, la fonction de contact est décomposée en deux: une fonction F_N traduisant le comportement du contact dans un mouvement normal à la pente, une fonction F_T traduisant le contact dans un mouvement tangentiel à la pente.

Fonction de contact normale F_N : on peut se référer à un certain nombre de travaux concernant l'indentation des métaux.

— Comportement élastique (partie réversible du comportement, énergie non dissipée): contact face du bloc-versant (fig. 4):

$$F_N = K_1 ah \quad (a: \text{demi-largeur du bloc})$$

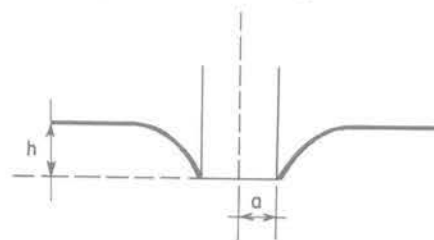


Fig. 4. — Contact plan-plan.

Contact point anguleux-versant (SNEDDON-1965):

$$F_N = K_1 \operatorname{tg} \theta h^2 \text{ (fig. 5)}$$

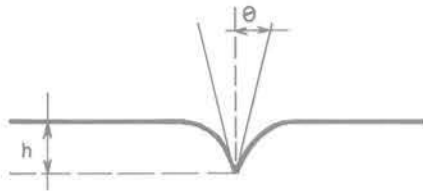


Fig. 5. — Contact point anguleux-versant.

— Comportement plastique (partie irréversible du comportement, énergie dissipée): contact face du bloc-versant:

$$F_N = K_2 \text{ quel que soit } h$$

Contact point anguleux-versant (JOHNSON-1970):

$$F_N = K_3 \operatorname{tg}^2 \theta h^2$$

— Comportement élasto-plastique: indentation d'une sphère dans un sol (SAMAMA-1982):

$$F_N = K_4 h^{3/2}$$

— Comportement plastique: indentation d'un coin «long» dans un sol (SAMAMA-1982):

$$F_N = K_5 h$$

Pour simplifier notre analyse, ces diverses fonctions de contact ont été schématisées de la manière suivante (fig. 6):

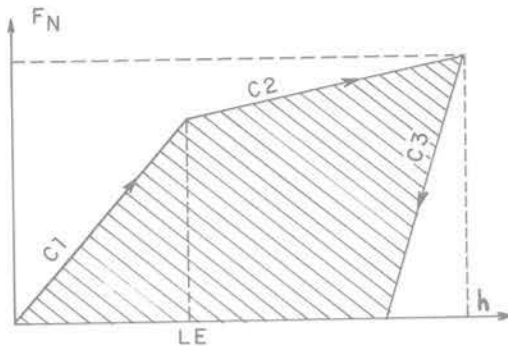


Fig. 6. — Diagramme force normale-enfoncement normal.

F_N = force normale de réaction du sol.

h = enfoncement normal du point de contact.

C_1 = 1^{er} paramètre caractéristique du contact à l'enfoncement.

C_2 = 2^e paramètre caractéristique du contact à l'enfoncement.

C_3 = 3^e paramètre caractéristique du contact à la restitution.

LE = limite des domaines C_1 et C_2 .

C_1 , C_2 , C_3 et LE sont quatre des cinq paramètres qui caractérisent le contact (le cinquième étant le coefficient de frottement MU).

On a $C_1 < C_3$ et $C_2 < C_3$. C_3 traduit un comportement essentiellement élastique, alors que C_1 et C_2 traduisent un comportement élastoplastique.

L'aire hachurée représente l'énergie perdue au cours du contact.

Les coefficients C_1 , C_2 , C_3 , LE et MU dépendent de la géométrie du contact et du comportement du matériau.

Si $C_1 > C_2$, cela correspond à un contact point anguleux-versant. Si $C_2 > C_1$, cela correspond à un contact face du bloc-versant.

Fonction de contact tangentielle F_T : le bloc ayant pénétré d'une profondeur h dans le versant, tout déplacement parallèle au versant va se traduire par la génération d'une force F_T liée à la mobilisation d'une force de butée à l'avant du bloc. Dans la version du programme, cette force a été supposée proportionnelle à h :

$$F_T = C_4 \cdot h$$

Le coefficient C_4 étant fonction de C_1 , C_2 et MU .

Ces forces sont calculées à chaque pas de temps (tant que le contact subsiste) et pour chaque point de contact. Pour un contact point anguleux-versant, on aura un point de contact, alors que pour un contact plan-plan, le programme détermine deux points de contact. L'équilibre des forces et des moments, ou centre de gravité du bloc, donne les vitesses pour l'incrément de temps suivant, et le cycle recommence. Le contact bloc-profil est rompu lorsqu'en tous les points de contact la force s'annule.

Influence de la forme du bloc sur sa trajectoire

La figure 7 ci-dessous représente les trajectoires a, b et c, calculées avec le modèle, pour deux blocs de formes différentes (un polygone régulier, un carré), de masse identique (6 560 kg), d'inertie égale (3 565 kg/m²) et d'encombrement comparable (pour chaque bloc, le diamètre du cercle circonscrit est d'environ 1 mètre).

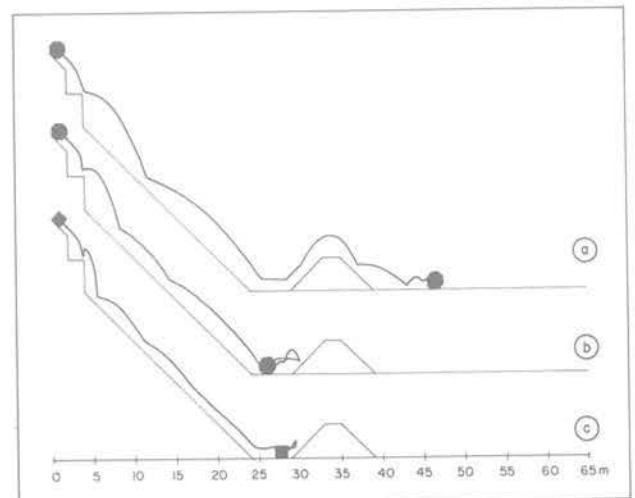


Fig. 7. — Influence de la forme et de la vitesse du bloc sur sa trajectoire. Cas a et c: $V_i = 2,8 \text{ m/s}$; cas b: $V_i = 1,4 \text{ m/s}$.

Dans les trois cas, la vitesse initiale V_i du bloc a été définie parallèle au premier segment du versant.

Le bloc polygonal, plus « rond », roule sur ses facettes et va plus loin que le bloc carré qui s'arrête bien à plat sur l'une de ces faces (a et c).

Si sa vitesse de départ est suffisante (a), le bloc polygonal franchira le merlon de protection. Si cette vitesse est faible (b), ce merlon sera de taille suffisante pour stopper le bloc.

Ces trois exemples montrent, d'une part, que la forme du bloc joue un rôle non négligeable sur sa trajectoire et qu'il est difficile de ne pas tenir compte de ce paramètre; et, d'autre part, qu'à partir d'un tel modèle, il est possible de dimensionner les ouvrages de protection.

2.3. La falaise de Montagny, en Savoie

La falaise surplombant le village de Montagny, en Savoie, a connu en janvier 1982 un écoulement dont s'est en particulier détaché un bloc de 25 m^3 qui, après avoir décrit une trajectoire de 350 mètres de dénivelé, traversant bois, éboulis et prés, s'est arrêté quelques mètres derrière la mairie.

Une étude approfondie du site et des traces laissées par le bloc sur le versant a permis de reconstituer la trajectoire exacte de celui-ci (MEMIER-1983).

Il s'agit d'un bloc de grès et conglomérat massif, en forme de parallélépipède régulier de 4 mètres de côté et d'épaisseur moyenne 1,40 mètre, d'un volume proche de 25 mètres cubes et dont la masse est de l'ordre de 65 tonnes. Ce bloc faisait partie d'une masse rocheuse de 200 mètres cubes environ, qui s'est également détachée de la falaise et dont la majeure partie s'est arrêtée au pied de celle-ci.

Le profil en travers de la trajectoire du bloc est représenté par la figure n° 8. Le modèle décrit ci-avant a été utilisé pour tenter de reconstituer cette trajectoire.

Reconstitution de la trajectoire par le modèle

— Représentation du bloc: en deux dimensions; celui-ci est représenté par un polygone à quatre côtés, de masse $64\,500 \text{ kg}$ et d'inertie $162\,000 \text{ kg/m}^2$ par rapport à son centre de gravité.

— Reconstitution du profil: le profil de la figure n° 8 est représenté par 13 segments. Le programme ne pouvant pas calculer l'écroulement même de la falaise, le profil choisi pour le calcul ne commencera qu'en pied de celle-ci, là où le bloc concerné se désolidarise de la masse et commence à glisser.

— Conditions initiales sur les vitesses: les vitesses « initiales » du bloc commençant à glisser ne sont pas connues exactement. Après une chute de trente mètres de haut (hauteur de la falaise), il est difficile de les calculer, étant donné qu'il y a eu de multiples fracturations. Ces vitesses ont été estimées à 15-20 m/s parallèlement au premier segment représenté. Le bloc glisse sur le segment jusqu'à la première rupture de profil.

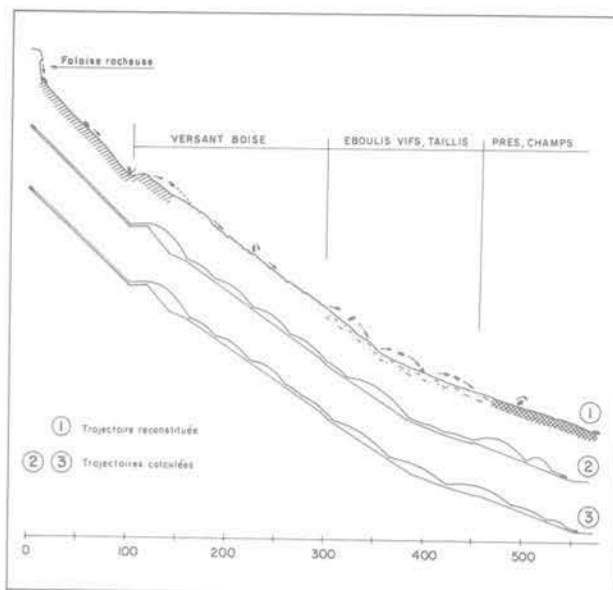


Fig. 8. — Trajectoires reconstituées et calculées du bloc.

— Trajectoires calculées: la figure n° 8 montre deux trajectoires calculées avec le modèle (2 et 3), pour le même profil et le même bloc au départ, seules les vitesses initiales ayant varié. La comparaison avec la trajectoire reconstituée (1) souligne la qualité de la modélisation.

2.4. La falaise du Grand Château (Bonneville, Haute-Savoie)

Un autre cas de chute de bloc a pu être étudié avec le même modèle. Il s'agit de la trajectoire d'un bloc de 4 m^3 issu de l'écroulement de la falaise de « Grand Château » dominant Bonneville (Haute-Savoie).

Cet écoulement, survenu en janvier 1984, concerne au départ un volume total mobilisé de 150 à 200 m^3 . Les blocs les plus gros, dont la masse n'excède pas 10 tonnes, se sont tous arrêtés dans la forêt, peu après le pied du cône d'éboulis, sauf un qui est descendu beaucoup plus bas en roulant et rebondissant, ne s'arrêtant qu'après une trajectoire de 400 mètres de dénivelé environ, soit à peu près 200 mètres de plus que le reste de la masse écroulée. Un relevé précis du versant où ce bloc a évolué, a permis de reconstituer sa trajectoire (MALATRAIT-1984).

Le profil est représenté sur la figure n° 9. Le bloc de calcaire, en forme de parallélépipède régulier de 2 mètres de côté, d'épaisseur 1 mètre, a une masse d'environ 10 tonnes.

Evaluation des risques

L'étude de la falaise montre que celle-ci présente d'autres masses décollées en cours de dislocation, et de volume peut-être plus important que celle écroulée en janvier 84. La structure très stratifiée de cette falaise met en évidence des bancs de calcaire alternés avec des lits marneux. L'épaisseur des plus gros bancs ne dépassant pas un mètre, il est légitime d'estimer que les blocs issus d'un autre écoulement seront très

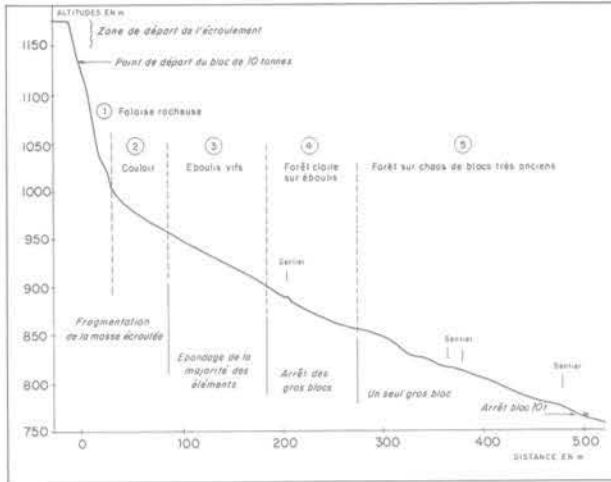


Fig. 9. — Tracé du profil relevé à Bonneville.

comparables à ceux observés en contrebas de la falaise. Il est donc apparu intéressant de tenter d'évaluer plus précisément les risques que représente la réapparition d'un tel phénomène.

Une série de trajectoires a donc été simulée à partir du modèle présenté. Le profil étudié (fig. 9) est découpé en cinq zones:

- Zone 1: la falaise où aucun bloc ne peut s'arrêter.
- Zone 2: le couloir où la masse écroulée vient se disloquer et où l'on peut compter quelques gros blocs (plusieurs m³) posés sur une matelas de fragments beaucoup plus fins (terre, petits cailloux).
- Zone 3: le cône d'éboulis vif où la majorité de l'éroulement est stoppé, quelle que soit la taille des blocs.
- Zone 4: cette zone correspond au pied du cône d'éboulis et au début de la forêt, avec un replat formé de très gros blocs anciens et qui constitue une zone privilégiée d'arrêt pour les blocs encore en mouvement.
- Zone 5: la forêt, où l'on trouve des blocs épars de taille respectable (entre quelques dizaines de dm³ et quelques m³), mais de moins en moins nombreux vers l'aval.

Pour des raisons déjà exprimées, le calcul des trajectoires ne commence qu'à la cote 1020 (fig. 9). Les vitesses ne pouvant être estimées à cet endroit (zone de fragmentation), les calculs ont été menés pour quatre hypothèses de vitesses initiales rapportées ci-dessous.

	Vitesse horizontale (m/s)	Vitesse verticale (m/s)	Vitesse de rotation (m/s)
Cas n° 1	1	0	0
Cas n° 2	2	0	0
Cas n° 3	1	1 (vers le bas)	3
Cas n° 4	0,8	3,2 (vers le bas)	0

Des trajectoires ont été calculées pour des blocs de 8 et 10 tonnes, de géométrie semblable à celle du bloc écroulé en janvier 84 (parallélépipède à base carrée) d'épaisseur 1 mètre. On a en outre fait varier les coefficients caractéristiques de chaque segment du profil pour marquer leur caractère aléatoire. Ainsi, 71 trajectoires ont été calculées. Quatre d'entre elles sont représentées figure 10, le cas n° 3 correspond à celui étudié sur le terrain.

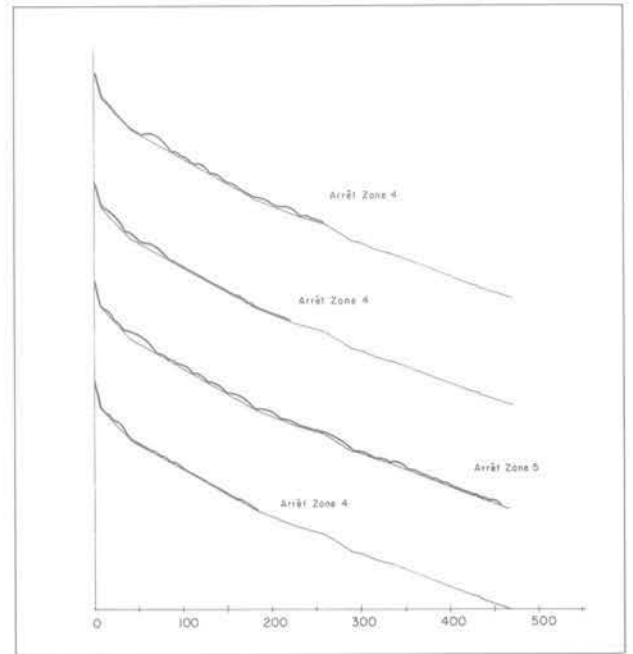


Fig. 10. — Quatre trajectoires calculées sur le profil de Bonneville.

Le tableau ci-dessous exprime, pour la totalité des trajectoires calculées, le nombre d'arrêts par zone décrite à la figure 9.

	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5
Nd d'arrêts (total: 71)	0	5	39	16	11 (dont 2 > 450 m)
Exprimé en %.....	0	7	55	22	16

Il faut remarquer que la répartition obtenue est très semblable à celle relevée sur le terrain pour des blocs de 8 et 10 tonnes, ce qui confirme que le risque de voir des trajectoires de blocs de cette taille dépasser un dénivelé de 450 mètres, s'il n'est pas nul, est faible, et que le cas observé est exceptionnel.

3. CONCLUSION

La prise en compte de la géométrie exacte des blocs rocheux, que permet le modèle présenté dans cet article, est un élément nouveau dans le calcul des

trajectoires. Elle constitue une amélioration par rapport aux modèles existants puisque, comme on peut l'observer sur le terrain et comme ce nouveau modèle l'a exprimé, la forme des blocs a une influence sensible sur leurs mouvements.

Le calage de ce modèle sur des écroulements réels dont on a pu reconstituer les trajectoires, comme ceux de Montagny ou Bonneville, permettra d'établir une base de données concernant les paramètres intervenant dans les fonctions de contact. Cette base de données rendra possible l'utilisation du modèle à des fins de prévision et de prévention, et non plus seulement à des fins d'analyse d'événements passés.

BIBLIOGRAPHIE

- ASTÉ, J.P.; CAMBOU, B.; FALCETTA, J.L. (1984). — *Comportement des masses rocheuses instables. De la prévision à la prévention*. IV symposium on Landslides, Toronto, vol. 1, II, 441-446.
- AZIMI, C.; DESVARREUX, P.; GIRAUD, A.; MARTIN-COCHER, J. (1982). — *Méthodes de calcul de la dynamique des chutes de blocs. Application à l'étude du versant de la montagne de la Pale (Vercors)*. Bulletin de liaison des L.P.C., 122, nov.-déc., 93-102.
- CUNDALL, P.A. (1971). — *The measurements and analysis of accelerations in rock slopes*. Thesis of Doctor of Sciences and Technology, London.
- HACAR, B.; BOLLO, F.; HACAR, R. (1977). — *Bodies falling down on different slopes. Dynamic study*. Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., (2), 91-95, Tokyo.
- JOHNSON, K.L. (1970). — *The correlation of indentation experiments*. J. Mech. Phy. Solids, vol. 18, 115-126.
- LOPEZ-CARRERAS, C. (1981). — *Dynamique des déplacements de matériaux sur les pentes naturelles*. Thèse de Docteur-Ingénieur, Institut Polytechnique de Lorraine, Nancy.
- MALATRAIT, A. (1984). — *Ecroulement de la falaise du Grand Château, dominant Bonneville (74). Evaluation des risques subsistants et définition des moyens de protection*. Rapport B.R.G.M. n° 84, A.G.I., 185, R.H.A.
- MÉLY-PALETTE (1982). — *Dynamique des sols. Simulation d'un éboulement*. Rapport de travail de fin d'études, B.R.G.M., Lyon.
- MÉMIER, B. — *Chutes de masses rocheuses à Montagny (73)*. Analyse des risques et définition des moyens à mettre en œuvre. Rapport B.R.G.M. n° 83, S.G.N., 135, R.H.A.
- PITEAU, D.R.; CLAYTON, R. (1978). — *Methods of protection. Rock-fall characteristics effecting the design of protection measures*. Landslides Analysis and Control, 176, Washington.
- SAMAMA, L. (1982). — *Analyse de la cinématique des masses rocheuses instables. Impact d'un bloc rocheux*. Rapport de travail de fin d'études, B.R.G.M., Lyon.
- SNEDDON, I.N. (1965). — *The relation between load and penetration with axisymmetric Boussinesq problem for a punch of arbitrary profile*. Int. J. of Eng. Science, vol. 3, 47-57.
- WAN SAI CHEONG, R. (1982). — *Etude théorique des phénomènes dynamiques lors d'une chute de pierres sur une pente*. Rapport de travail de fin d'études, B.R.G.M., Lyon.