

Modélisation des grands éboulements rocheux par épandage. Application aux sites de La Clapière (Alpes-Maritimes) et de Séchilienne (Isère)

Jean-François SERRATRICE

Laboratoire régional des ponts et chaussées
d'Aix-en-Provence

jean-francois.serratrice@equipement.gouv.fr

■ RÉSUMÉ

La modélisation par épandage vise à simuler des éboulements rocheux intermédiaires entre les chutes de blocs et les éboulements en grande masse, avec application à des analyses de risque. Elle consiste à simuler la propagation le long d'un versant et l'accumulation dans la vallée de volumes rocheux élémentaires pour de fortes dissipations d'énergie et des volumes limités à quelques millions de mètres cubes. La dissipation s'effectue par frottement et vitesse limite. Les calculs sont effectués à trois dimensions sur un modèle numérique de terrain (MNT) représentant la topographie du site, en vue de rechercher la forme finale de la masse éboulée. En pratique, les calculs sont conduits sous forme paramétrique pour différents scénarios de déclenchement ou des scénarios étagés et différents paramètres mécaniques. Des exemples d'application des MNT à l'étude des versants instables sont présentés puis la méthode de calcul par épandage est décrite et appliquée aux sites de La Clapière et des Ruines de Séchilienne. De nombreuses modélisations ont été effectuées suivant différents scénarios plausibles ; les résultats numériques permettent de visualiser les trajectoires, les accumulations de blocs et les effets de dispositifs de protection (merlons). La modélisation par épandage est ainsi un outil relativement simple et bien adapté pour estimer la forme finale d'un éboulement rocheux.

[Modeling of major rockfalls by spreading : Application to the « La Clapière » and « Séchilienne » sites \(French Alps\)](#)

■ ABSTRACT

A spreading-based modeling approach is intended to simulate medium-intensity rockfalls between isolated falling rocks and massive rockslides, with an application to risk analysis. This approach entails simulating the propagation along a hill slope and then the accumulation on the valley floor of elementary rock volumes for high-energy dissipations and volumes limited to a few million cubic meters. The dissipation effect occurs by drops in both friction and speed. Calculations are carried out in three dimensions on a numerical field model (NFM) representative of the site's topography, in the aim of identifying the ultimate shape of the falling rock mass. In practice, computations proceed in parametric form for various triggering scenarios or staged scenarios and a number of mechanical parameters. NFM application examples focusing on unstable slopes are presented herein, and the calculation method by means of spreading is described and implemented at the "La Clapière" and "Ruines de Séchilienne" sites. Many modeling set-ups have been derived according to an array of feasible scenarios ; the numerical results obtained enable visualizing paths, block accumulation and the effects of protective measures (bund walls). Modeling by spreading is thus a relatively simple tool well adapted for estimating the ultimate shape of a rockfall.

INTRODUCTION

Les éboulements rocheux constituent un risque largement répandu dans les régions montagneuses. Ces phénomènes adoptent différentes formes suivant la masse totale des éléments de roche impliqués dans le mouvement, en allant des chutes de pierres ou de blocs jusqu'aux éboulements en grande masse. S'il peut être envisagé de maîtriser les premiers dans les meilleurs des cas, les éboulements rocheux sont incontrôlables quand les volumes mobilisés deviennent importants. Seules des actions de prévention et de surveillance peuvent être envisagées vis-à-vis de tels risques, en vue d'en minimiser les conséquences.

La masse ou le volume mobilisé ouvre donc sur une première classification des mouvements rocheux, des chutes de blocs aux éboulements en grande masse. Dans le premier cas, la propagation des éléments rocheux s'exprime plutôt en termes d'impacts et de rebonds sur le support que constitue le versant et se caractérise par de faibles interactions entre les éléments. Au contraire, les mouvements en grande masse font intervenir de fortes interactions entre les éléments, interactions qui peuvent être traduites sous différentes formes, en termes de viscosité ou de dissipation d'énergie par exemple. L'analyse en retour d'exemples catastrophiques connus montre d'ailleurs une sur-augmentation de la distance de propagation avec le volume rocheux mis en jeu par effet de « fluidisation » [1-6].

En pratique, quel que soit le type de mouvement, l'analyse complète d'un site passe par différentes étapes, telles que l'étude du versant instable et du massif rocheux fracturé aux différentes échelles concernées, l'étude des processus de dégradation du massif puis de déclenchement des ruptures, l'étude des mécanismes de propagation et d'étalement, puis l'étude des interactions éventuelles avec des constructions situées en aval ou des ouvrages de protection. On ne dispose pas à ce jour d'outils permettant de résoudre l'ensemble de ces questions simultanément, d'autant que les méthodes d'étude et d'analyse dépendent du site concerné et du type de mouvement. Une autre grande difficulté provient du fait que ces problèmes sont tridimensionnels.

La méthode présentée ici ne concerne qu'une partie seulement de l'analyse des éboulements en grande masse, pour des situations non catastrophiques et des volumes de quelques millions de mètres cubes. Dans la chaîne d'analyse évoquée ci-dessus, elle s'adresse essentiellement au calcul de la forme finale de la masse éboulée que constitue cet épandage. Le modèle obtenu permet d'examiner la forme et l'extension du volume foisonné, dans l'optique d'une analyse de risque par exemple.

Ce type de modélisation nécessite au préalable l'élaboration d'un MNT (Modèle Numérique de Terrain) aussi précis que possible du site. Cette donnée permet de traiter le problème à trois dimensions. Il faut souligner que l'analyse des MNT offre diverses possibilités qui peuvent être mises à profit dans l'étude morphologique ou structurale du versant rocheux, l'analyse de la dégradation du massif, des mouvements superficiels, puis des mécanismes de déclenchement (estimation des volumes instables et disponibles, par exemple). Des exemples de ces méthodes appliquées à l'étude des MNT seront donnés.

La méthode de calcul par épandage est présentée ensuite, en référence à la classification des mouvements rocheux et pour des applications à des volumes limités et des mécanismes à forte dissipation d'énergie. Des illustrations de la mise en œuvre de cette méthode seront données pour les sites de La Clapière (Alpes-Maritimes) [7-8] et des Ruines de Séchilienne (Isère) [9].

UTILISATION DES MODÈLES NUMÉRIQUES DE TERRAIN

■ Caractéristiques des MNT utilisés sur le site de La Clapière

Les MNT utilisés ici donnent l'altitude du site considéré aux nœuds d'un réseau à maille carrée de 2 m de côté. Sept MNT ont été levés à partir de photos aériennes prises entre 1970 et 1997 sur le site de La Clapière. Pour couvrir les 150 ha du versant, les premiers MNT contiennent

400 000 points environ (maille de 2 m). Les levés des MNT les plus récents couvrent un domaine plus large, en intégrant la vallée de la Tinée en aval du versant, pour permettre les calculs de propagation en masse (surface 225,5 ha ; 557 700 points).

Les altitudes du MNT sont données au décimètre près, mais la précision est moindre en réalité et la superposition de deux MNT différents montre des écarts d'altitudes métriques dans les zones des versants non affectées par des mouvements. Par ailleurs, les anciens MNT de La Clapière sont incomplets, avec des altitudes qui n'ont pas été levées en certains nœuds du réseau, en raison de la présence de végétation ou d'escarpements.

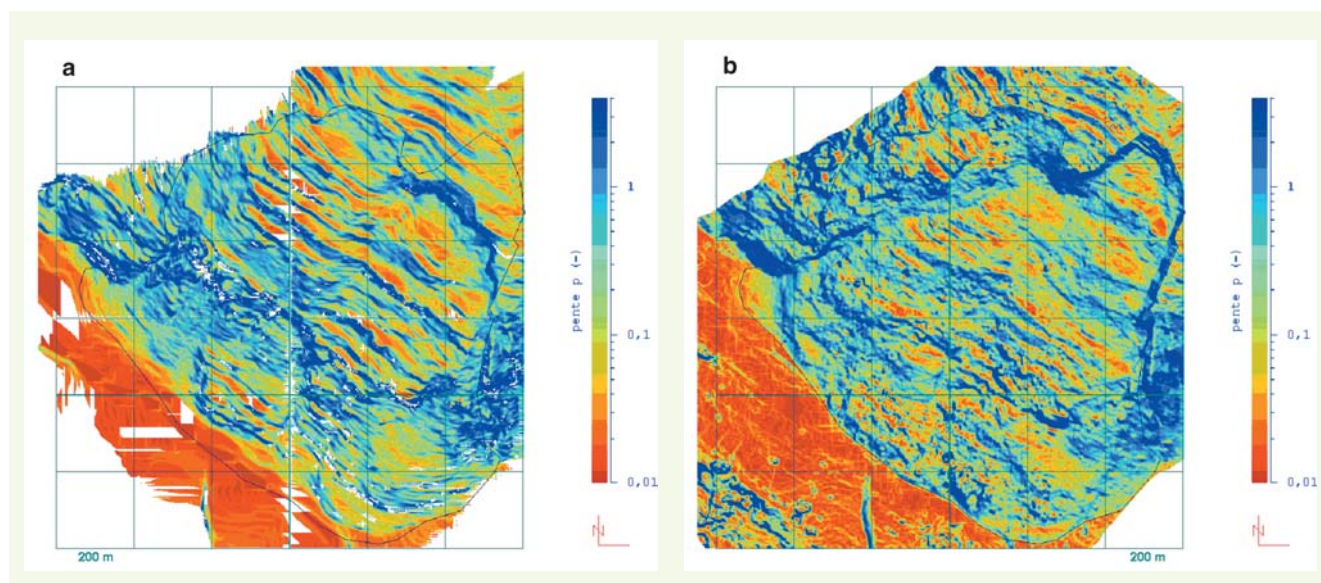
■ Cartes des pentes

Les MNT sont représentés par des cartes ou des vues en perspective et sous différentes formes : carte des altitudes, carte des pentes, carte des directions des plus grandes pentes, carte des courbures maximales de pente. Ces représentations donnent un moyen d'étudier la morphologie du versant et son évolution dans le temps, quand on dispose de plusieurs MNT levés à des dates successives.

La **figure 1** montre les cartes des pentes du versant de La Clapière en 1970 et en 1997 (la vallée de la Tinée est située en bas à gauche, à 1 100 m d'altitude environ ; le haut du versant est situé en haut à droite, à l'altitude de 1 900 m environ). Le carroyage est donné à un pas de 200 m. Les faibles pentes sont représentées en rouge, les fortes pentes en bleu. Le polygone représenté sur ces vues donne l'extension des désordres en 1997 (aire égale à 85,6 ha). La comparaison des deux images montre l'évolution du versant pendant cette période de près de trente ans, avec le creusement des escarpements sommitaux, les régressions amont et l'avancée du pied du versant dans la vallée de la Tinée.

En 1970, le versant conserve encore des traits contrastés marqués par la présence des terrasses qui traversent le site en suivant approximativement les lignes de niveau (**figure 1a**). Ces terrasses traduisent le fauchage qui est à l'origine de la formation du massif [7]. Le glissement principal se repère essentiellement par son escarpement sommital, nettement plus prononcé à l'est (région du glissement principal, plus ancien) qu'à l'ouest (sommet du lobe nord-ouest). Le pied du glissement se trouve en retrait de plus de 70 m par rapport à la position qu'il occupera en 1997. L'affaissement de la partie haute du glissement concourt au déchaussement progressif de l'escarpement sommital. En 1997, le promontoire central, qui s'avance au milieu de l'escarpement amont, s'élève à plus de 80 m au-dessus du glissement principal (**figure 1b**). En considérant que sa base forme un carré de 100 m de côté, son volume peut être estimé à 800 000 m³. Les formes apparaissent avec moins de netteté en raison des mouvements superficiels qui accompagnent le mouvement général.

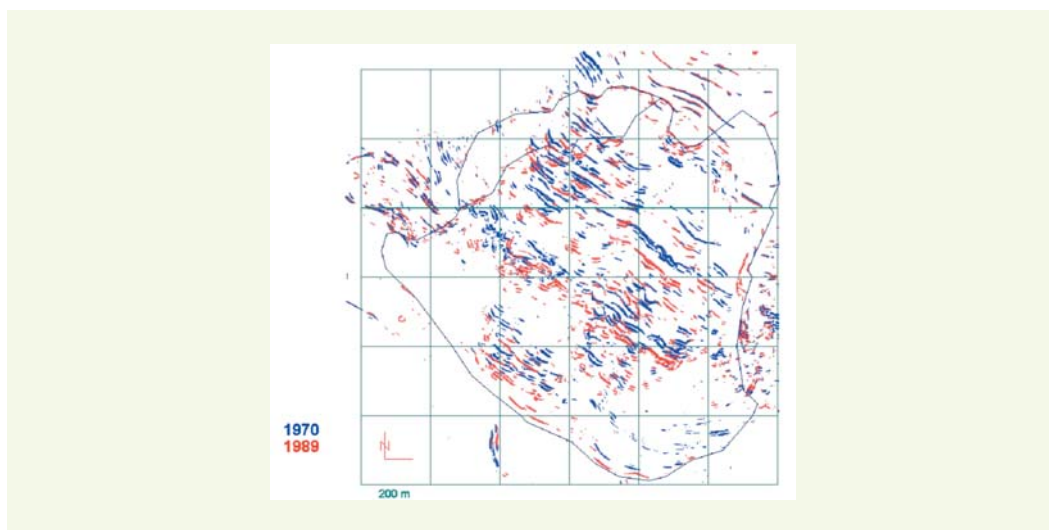
figure 1
Cartes des pentes du
versant de La Clapière :
a - En 1970.
b - En 1997.



■ Courbures de pente

Par une dérivation supplémentaire du MNT à partir de la carte des pentes, il est possible d'obtenir la courbure maximale en chaque point d'un MNT (inverse du rayon de courbure maximal). Les courbures les plus fortes marquent essentiellement les terrasses. Dans ce mode de représentation, chaque terrasse apparaît par deux lignes parallèles qui révèlent le bord aval de la terrasse et le pied du talus amont, respectivement. Au fil des ans, les contrastes s'étiolent petit à petit, en raison de la déstructuration progressive des rebords des terrasses et du remplissage des pieds de talus amont. Néanmoins, ces doubles lignes peuvent servir de marqueur pour suivre l'évolution de la morphologie du terrain dans l'analyse qualitative des mouvements de surface. La **figure 2** permet d'apprécier cette évolution, en comparant les courbures de pente de 1970 à celles de 1989 sur une même carte, les marqueurs étant représentés en bleu et en rouge respectivement.

figure 2
Comparaison des cartes de courbure maximale en 1970 et 1989. Versant de La Clapière.



Ces cartes montrent clairement l'évolution de la surface du glissement aux endroits où le relief local le permet. Les deux terrasses principales qui apparaissent au tiers et aux deux tiers du versant constituent des marqueurs privilégiés et montrent des avancées de l'ordre de 50 mètres. Sans procurer le champ des déplacements en surface, ces cartes en donnent néanmoins une image globale. Ce résultat est rendu possible ici, car l'amplitude des déplacements observés en surface entre 1970 et 1989 dépasse largement la maille du MNT, d'une part, et la marge d'incertitude des marqueurs, d'autre part.

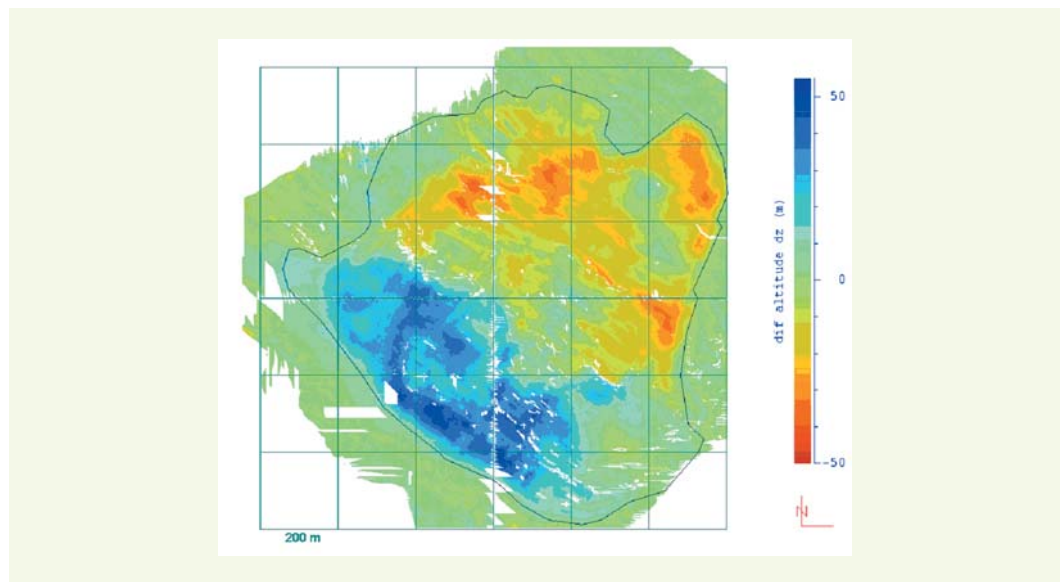
■ Différences d'altitude

Le calcul de la différence d'altitude aux points communs de deux MNT offre un moyen de visualiser les zones des désordres à la surface du versant et d'effectuer un bilan de volume [10]. La vue en plan de la **figure 3** montre les différences d'altitude entre 1970 et 1997 pour La Clapière. Ces différences sont comptées de - 50 à + 55 m, et sont représentées par des couleurs arc-en-ciel, du rouge pour les effondrements en tête de glissement au bleu pour les soulèvements en pied de glissement.

Le volume qui sépare les surfaces topographiques à deux dates différentes constitue le bilan de volume recherché. Ici, le calcul est effectué pour chacun des couples de MNT par sommation des différences d'altitude aux points communs situés à l'intérieur d'un polygone qui délimite tout ou partie de la région des mouvements. Ainsi, le bilan de volume peut être effectué sur l'ensemble du glissement ou par secteurs. La principale difficulté dans l'établissement des bilans de volume provient des erreurs de calage des MNT les uns par rapport aux autres ou la présence de « trous » dans les MNT. Pour pallier ces erreurs de calage, il est nécessaire de recourir à des corrections.

D'après les calculs, les variations relatives de volume sont faibles, inférieures à un pour-cent, si l'on estime le volume en mouvement à 50 millions de mètres cubes. Ces variations indiquent une

figure 3
Carte des différences
d'altitude entre 1970
et 1997. Versant de La
Clapière.



contractance dans la région la plus ancienne du glissement principal (côté sud-est). Par contre, un changement de régime dilatant vers contractant semble avoir pris naissance dans la région nord-ouest du glissement, pendant la période 1989-1994, à la suite du paroxysme de 1987 et avant la période de ralentissement actuelle (ouverture de la faille située en aval du lobe nord-ouest *cf.* [figure 1](#)).

■ Épandage par une méthode géométrique simplifiée

L'utilisation d'un MNT permet aussi de mettre en œuvre une méthode géométrique simplifiée en vue d'évaluer les caractéristiques d'un épandage, par exemple. Cette méthode consiste à installer des volumes en forme de cônes sur le versant, pour simuler la présence d'une masse éboulée entravant la vallée (bouchure) et dans un état final après éboulement. Cette méthode avait été utilisée sur le site de La Clapière, pendant la période de paroxysme en 1987, afin d'évaluer les risques d'extension des bouchures sur le versant opposé, de formation de lacs en amont des seuils ainsi formés et de rupture de ces barrages naturels. Différents scénarios avaient été envisagés, chaque cône représentant un volume donné de terrain glissé et foisonné. Le calcul de l'intersection du cône avec le terrain naturel (représenté à l'époque par un maillage de facettes) donnait la position et la côte du seuil de la bouchure. Un exemple est donné sur la [figure 4](#) pour la région est du site (Belloire), en utilisant le MNT de 1997 comme support. Les bouchures sont figurées en couleur sur la carte des pentes du MNT, qui est représenté en niveaux de gris (volumes éboulés égaux à 1, 2 et 5 10⁶ m³).

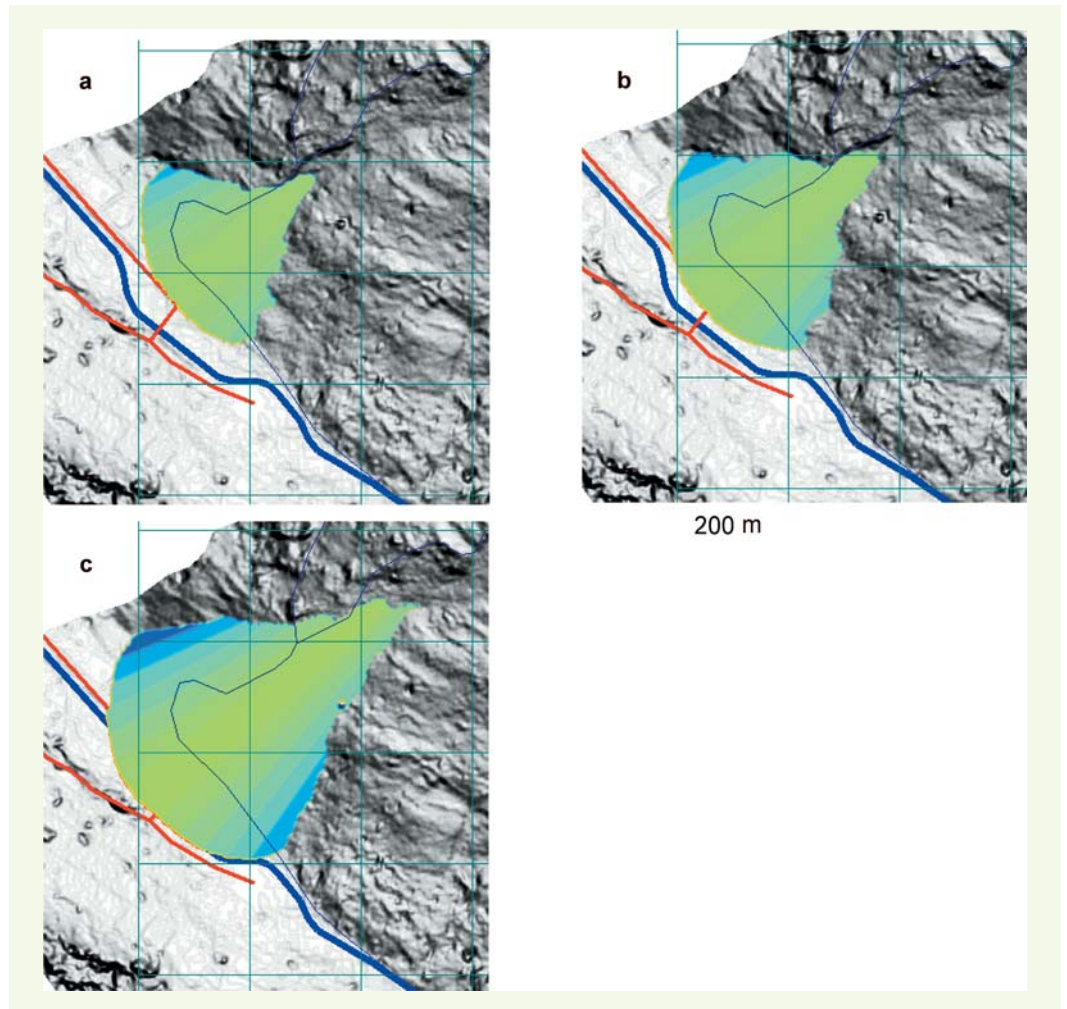
Ces descriptions purement géométriques et paramétriques ne sont là que pour éclairer les différents aspects des épandages, en tenant compte de la morphologie du versant et de la vallée. Les contours calculés des pieds de bouchures ne prennent pas en compte des phénomènes de propagation plus réalistes, tels que des blocs isolés supplémentaires qui viendraient se propager au-delà du pied de ces cônes par exemple. À ce titre, des cônes à génératrice concave pourraient être introduits dans le calcul, pour un résultat plus réaliste, mais tout aussi simpliste.

MODÉLISATION PAR ÉPANDAGE

■ Principe de la méthode

La modélisation par épandage consiste à simuler la propagation le long d'un versant et l'accumulation dans la vallée de volumes rocheux élémentaires et indépendants. Le calcul s'appuie sur la topographie du site, définie au moyen d'un MNT. Les calculs consistent à déverser un grand nombre de volumes élémentaires à partir d'une ligne de départ fixée *a priori* pour simuler un scénario de déclenchement donné. Chaque volume élémentaire glisse sur la surface topographique représentée

figure 4
 Représentation simplifiée
 d'épandages
 par des cônes inclinés à
 30 degrés de pente.
 a - Volume $1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.
 b - Volume $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.
 c - Volume $5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.



par le MNT. En fin de trajectoire, le MNT est mis à jour en augmentant les altitudes en chaque nœud du réseau de l'épaisseur du volume élémentaire immobilisé dans la vallée. Ce processus permet de représenter l'accumulation progressive des volumes élémentaires et de modifier les trajectoires de ceux qui arrivent successivement. Après l'arrivée du dernier élément, le modèle d'épandage permet d'examiner la forme et l'extension de la masse éboulée et foisonnée et de calculer toutes ses propriétés géométriques (épaisseurs, pentes, etc.). D'autres phases d'éboulement peuvent être simulées ensuite (scénarios étagés).

■ Volume élémentaire

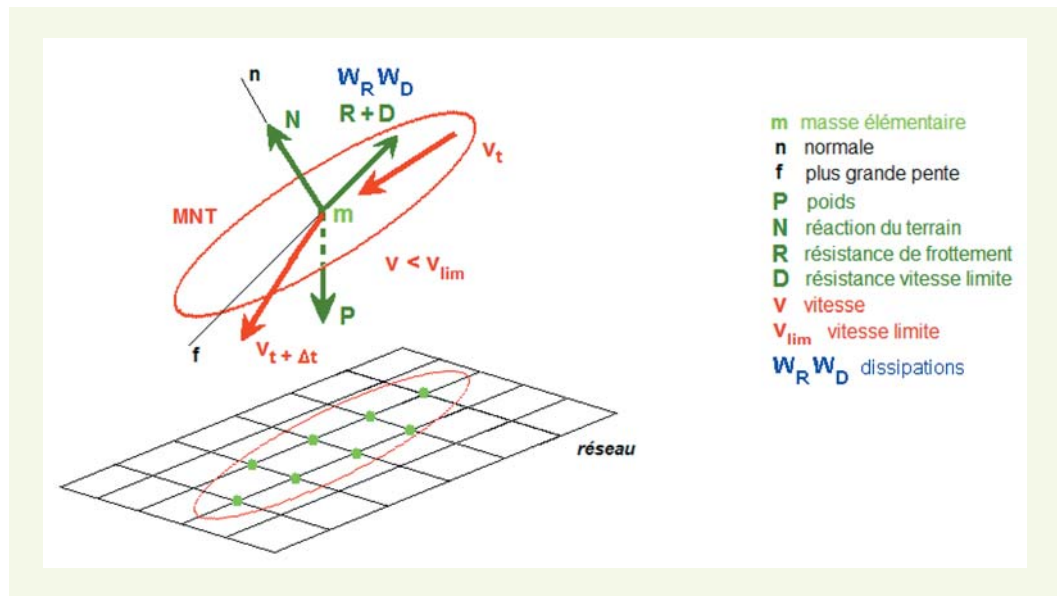
Chaque volume élémentaire est supposé prendre la forme d'un parabolôïde de section elliptique dont l'équation est définie par $z/c = 1 - x^2/a^2 - y^2/b^2$ dans les axes principaux et au moyen de trois paramètres a , b et c . L'équation du volume élémentaire peut être paramétrée au moyen d'un coefficient d'allongement g et d'un coefficient d'étalement e définis par $g = a/b$ et $e = c/a$. Au repos sur un plan horizontal, le volume élémentaire vaut $V = \pi e a^3/2 g$ et l'aire de la base est $S_b = \pi a^2/g$. V , e et g étant donnés, $a^3 = 2 V g/\pi e$. Pendant le glissement, les axes principaux de l'ellipsoïde sont déterminés par la direction de sa vitesse et la plus grande pente du versant au point considéré de la trajectoire (figure 5).

■ Équation du mouvement et vitesse limite

Le calcul de la trajectoire d'un volume élémentaire repose sur l'équation du mouvement d'une masse glissant le long d'un plan incliné. En un point donné de la trajectoire, l'accélération de la masse est donnée par :

$$a = d^2s/dt^2 = -g (\mathbf{k} \cdot \mathbf{f} + \tan\varphi \mathbf{k} \cdot \mathbf{n})$$

figure 5
Position du solide
élémentaire sur le MNT au
temps t .



où t est le temps, s l'abscisse curviligne, g l'accélération de la pesanteur, \mathbf{k} le vecteur représentant la verticale, \mathbf{n} la normale au plan, \mathbf{f} le vecteur dirigé selon la plus grande pente et φ l'angle de frottement entre le plan et la masse (\mathbf{k} , \mathbf{n} et \mathbf{f} sont des vecteurs unitaires, \mathbf{k} et \mathbf{n} sont dirigés vers les z croissants). Le long d'un plan incliné où φ est constant, l'accélération a un module constant si $(\mathbf{k} \cdot \mathbf{f} + \tan\varphi \mathbf{k} \cdot \mathbf{n}) > 0$, sans quoi la masse reste immobile.

Pendant le glissement, le frottement $\mu = \tan\varphi$ oppose une force résistante \mathbf{R} au mouvement, avec une dissipation d'énergie W_R . L'accélération étant constante et positive, la vitesse de la masse rocheuse augmente indéfiniment, malgré la dissipation d'énergie sur sa base. En pratique, une dissipation interne de l'énergie, du fait de l'interaction entre les éléments rocheux, conduit à limiter la vitesse réelle de la masse en mouvement. Dans le présent modèle, cette dissipation complémentaire est déterminée en imposant au solide une vitesse limite v_{lim} . Ce procédé rudimentaire permet d'éviter de recourir à des lois rhéologiques plus complexes.

■ Le modèle « versant et vallée »

L'analyse du modèle le long d'un plan incliné permet de montrer que la limitation de la vitesse du solide à la vitesse v_{lim} revient à ajouter, à partir du moment où la vitesse atteint v_{lim} , une force résistante \mathbf{D} à la force de frottement \mathbf{R} . Ces deux forces, qui sont toutes deux opposées à \mathbf{f} , ont pour module :

$$R = m g \cos\beta \tan\varphi \quad D = m g \sin\beta (1 - \tan\varphi/\tan\beta)$$

où m est la masse et β est l'angle du plan incliné avec l'horizontale. L'énergie dissipée par chacune de ces forces est :

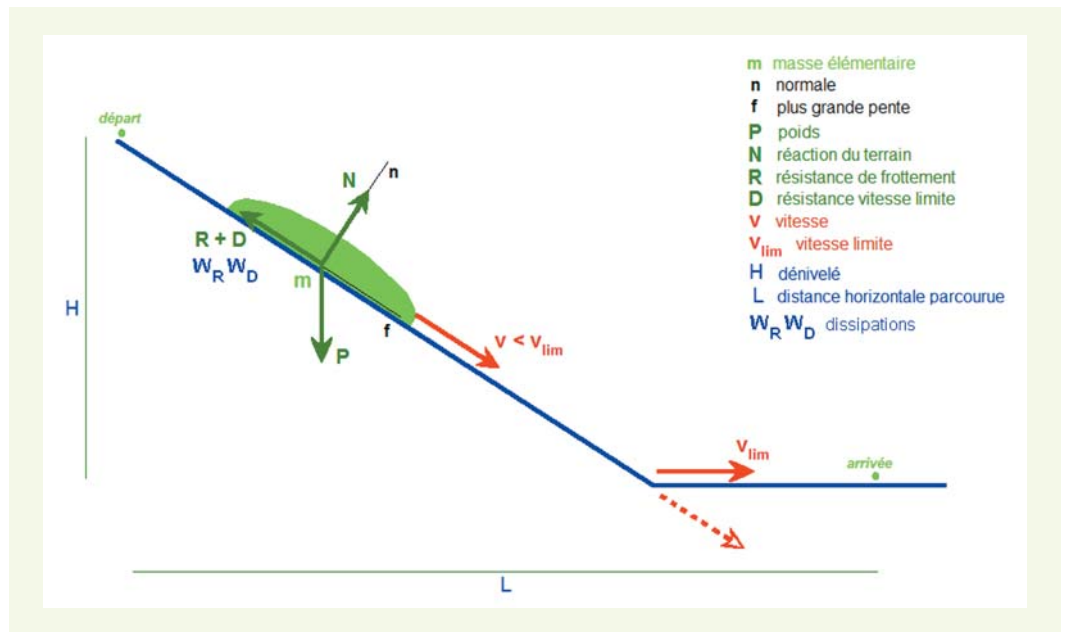
$$W_R = m g \cos\beta \tan\varphi (s - s_{lim}) \quad W_D = m g \cos\beta (\tan\beta - \tan\varphi) (s - s_{lim})$$

où s est l'abscisse curviligne le long de la trajectoire et s_{lim} est l'abscisse curviligne à partir de laquelle la vitesse v_{lim} a été atteinte.

Si l'on considère maintenant un versant représenté par un plan incliné débouchant sur une vallée horizontale (modèle « versant et vallée », figure 6), il est aisé de montrer que les énergies dissipées le long de la trajectoire, du point de départ situé à l'altitude H dans le versant au point d'arrivée dans la vallée sont :

$$W_R = m g H \tan\varphi/\tan\beta + m v_{lim}^2/2 \quad W_D = m g H (1 - \tan\varphi/\tan\beta) - m (v_{lim}^2 - v_0^2)/2$$

figure 6
Modèle « versant et vallée » et équilibre dynamique d'un volume élémentaire.



où v_0 est la vitesse initiale, et que le bilan d'énergie est équilibré :

$$E_p + E_c + W_R + W_D = E_{po} + E_{co}$$

où E_{po} et E_p sont les énergies potentielles au départ et à l'arrivée, E_{co} et E_c les énergies cinétiques correspondantes ($E_c = 0$ à l'arrivée), et $E_p - E_{po} = m g H$.

D'après les équations ci-dessus, donnant W_R et W_D au point d'arrêt dans la vallée, il apparaît que m , H , β et φ étant donnés, W_R et W_D varient avec le carré de la vitesse limite v_{lim}^2 . W_R augmente avec v_{lim}^2 , tandis que W_D diminue quand v_{lim}^2 augmente. La dissipation W_D est d'autant plus petite que v_{lim} augmente. D'après l'équation ci-dessus, qui donne W_D en fonction de v_{lim}^2 , W_D s'annule pour :

$$v_{lim\ max}^2 = v_0^2 + 2 g H (1 - \tan\varphi/\tan\beta)$$

Au-delà, si $v_{lim} > v_{lim\ max}$, $W_D = 0$ et la dissipation est assurée par le seul frottement $\mu = \tan\varphi$.

Si l'on considère maintenant la distance horizontale totale L parcourue par le solide, celle-ci a pour expression :

$$L = H/\tan\beta + v_{lim}^2/2g \tan\varphi$$

En introduisant l'angle φ_a défini par le rapport entre la dénivelée et la distance de propagation horizontale totale ($\tan\varphi_a = H/L$) et improprement appelé « angle de frottement apparent », les deux expressions précédentes aboutissent à :

$$1/\tan\varphi_a - 1/\tan\beta = v_{lim}^2/2g H \tan\varphi$$

soit :

$$v_{lim}^2 = 2g H (\tan\varphi/\tan\varphi_a - \tan\varphi/\tan\beta)$$

La vitesse v_{lim} dépend de la dénivelée H , de la pente du versant β et du frottement φ . Les angles β , φ et φ_a doivent vérifier les inégalités suivantes, avec, en particulier, $\tan\varphi_a < \tan\beta$:

$$0 < 1 - \tan\varphi/\tan\varphi_a < 1 - \tan\varphi/\tan\beta < 1$$

■ Expression de la vitesse limite critique v_{crit}

L'expression précédente donne un moyen d'estimer une vitesse limite v_{lim} , connaissant la dénivelée H , l'angle β du versant, l'angle φ_a et le frottement φ sous la base éléments de volume. Le

paramètre φ_a permet en outre d'introduire l'effet de masse des éboulements de grande ampleur, la réduction du frottement apparent allant de pair avec l'augmentation du volume mis en jeu V , par réduction de la dissipation et effet de fluidisation. Des études de cas rapportées dans la littérature ont permis d'établir des corrélations entre φ_a et le volume éboulé $\varphi_a = \varphi_a(V)$.

Par la suite, les éboulements qui répondent à ce type de règle empirique seront qualifiés de catastrophiques. Au volume V de roches en mouvement sera associé l'angle φ_a correspondant par l'une ou l'autre des relations empiriques en usage, pour obtenir une vitesse limite qualifiée de critique et notée v_{crit} , caractéristique d'un éboulement catastrophique :

$$v_{crit}^2 = 2g H \tan\varphi (1/\tan\varphi_a - 1/\tan\beta)$$

Une réduction de φ_a , qui indique un étalement plus large, s'accompagne d'une augmentation de la vitesse critique v_{crit} , pour des valeurs données des autres paramètres, H , β et φ . Par la suite, la vitesse limite v_{lim} sera choisie inférieure à v_{crit} pour simuler des épandages progressifs, à forte dissipation et non catastrophiques ($v_{lim} < v_{crit}$). En apportant une source de dissipation complémentaire pendant le mouvement, la vitesse v_{lim} règle le taux de fluidisation de la masse. Par construction du modèle, cette dissipation n'est pas de nature visqueuse, car elle ne dépend pas de la vitesse, d'après l'expression de W_D donnée plus haut.

Pour une configuration géométrique donnée, un frottement donné et une vitesse limite donnée, la somme des dissipations d'énergie W_R (frottement) et W_D (vitesse limite) augmente linéairement avec le volume déplacé, comme le prévoit la configuration « versant et vallée ». La réponse du modèle est linéaire à ce titre et ne reflète pas l'effet de masse, par lequel la dissipation diminue quand le volume déplacé augmente, dans le cas de situations catastrophiques. Toutefois, l'analyse du cas « versant et vallée » permet de donner un moyen d'évaluer une vitesse limite critique en fonction de l'angle φ_a , afin de tenir compte de l'effet de masse par le calcul et en adoptant une vitesse limite v_{lim} en retrait de la vitesse critique. De ce fait, le modèle permet théoriquement de représenter en continu la réponse de ruptures en masse et en grande masse, pour plusieurs ordres de grandeur du volume éboulé.

■ Calcul de la trajectoire le long du MNT

À chaque pas d'intégration, en un point donné de la trajectoire, l'ellipse du volume élémentaire en mouvement sert de contour pour calculer la normale \mathbf{n} au versant ainsi que la plus grande pente \mathbf{f} , d'après le MNT (cf. figure 5). Le vecteur vitesse \mathbf{v}_t est calculé alors, connaissant le vecteur vitesse $\mathbf{v}_{t-\Delta t}$ au pas de temps précédent.

La masse est supposée rester en contact avec le terrain. Il est possible de tenir compte ou pas de la courbure du terrain (terrasses et rebords, fond de la vallée), et de la transmission intégrale ou non de l'énergie cinétique aux points de forte courbure, comme au pied du plan incliné dans le modèle « versant et vallée ». Cela donne une façon supplémentaire de dissiper de l'énergie, en plus du frottement φ et de la vitesse v_{lim} .

Le déclenchement du mouvement n'est pas décrit par le modèle. Chaque bloc élémentaire part d'un point tiré au hasard le long de la ligne de départ, avec une vitesse initiale nulle ($v_0 = 0$) et dans une direction donnée par les coordonnées polaires (φ_0, θ_0) , où θ_0 est défini par la pente du terrain au point de départ. Le volume initial V_0 s'accroît du fait du foisonnement au début de la progression le long de la trajectoire, suivant la loi empirique :

$$V = f V_0 \quad f = 1 + C_f (1 - \exp(-s/s_f))$$

où f est le foisonnement et C_f et s_f sont deux paramètres. De même, l'allongement g et l'étalement e peuvent changer au cours du déplacement, au détriment d'un nombre de paramètres supplémentaires à introduire dans le modèle. Le poids volumique initial de la roche γ est donné pour relier les masses et les volumes et leur évolution en fonction du foisonnement.

Un calcul portant sur n volumes élémentaires peut être effectué en affectant une vitesse limite v_{lim} commune à tous les éléments ou en affectant des vitesses différentes. Dans ce cas, la vitesse limite du bloc i est tirée au hasard dans un intervalle donné $[v_{lim\ min}, v_{lim\ max}]$.

Le calcul de la trajectoire de chaque volume élémentaire est effectué pas à pas en limitant le pas de temps afin que l'incrément de déplacement reste inférieur à 1 m (une demi-maille du MNT). Après la stabilisation d'un volume élémentaire dans sa position finale, les altitudes des points du MNT compris à l'intérieur de la base du bloc sont mises à jour, augmentées de l'épaisseur (variable) du bloc. Le calcul passe au volume suivant jusqu'au n ème volume élémentaire, pour atteindre le volume de roche déversé dans le scénario de rupture considéré.

■ Récapitulation des paramètres

Le modèle comprend les paramètres suivants :

- le poids volumique initial de la roche γ ,
- l'angle de frottement φ , constant quelle que soit la vitesse de propagation,
- le volume initial du bloc élémentaire $V_{o\ elem}$,
- le nombre n de volumes élémentaires, pour un volume total initial $V_o = n V_{o\ elem}$,
- le coefficient de foisonnement C_f et la distance caractéristique de foisonnement s_f ,
- le coefficient d'allongement initial g et un paramètre de calcul de son évolution C_g ,
- le coefficient d'étalement initial e et un paramètre de calcul de son évolution C_e ,
- les coordonnées des points $L_1(x_1, y_1)$ et $L_2(x_2, y_2)$ des extrémités de la ligne de départ sur le MNT,
- la vitesse initiale v_o , et sa direction initiale φ_o ,
- la vitesse limite minimale $v_{lim\ min}$ et la vitesse limite maximale $v_{lim\ max}$,
- un coefficient C_{wp} compris entre 0 et 1 pour tenir compte d'une dissipation aux changements de pente.

À ces paramètres s'ajoutent différents paramètres de contrôle des calculs (précision, temps maximal, paramètres d'affichage, etc.). La méthode de calcul des trajectoires des volumes élémentaires a été testée par comparaison à des réponses théoriques connues, en considérant des configurations particulières de terrains sous la forme de MNT, à deux ou trois dimensions (plan incliné, profil « versant et vallée », profil parabolique, profil en forme de cycloïde, sphère, parabolôïde de révolution).

■ Méthodologie d'étude

Pour un site donné, la mise en œuvre de la modélisation par épandage ne peut s'inscrire en dehors de la chaîne d'analyse évoquée en introduction et qui fait appel à la connaissance approfondie du site, l'analyse structurale du massif rocheux, l'étude des mécanismes de rupture, des facteurs de déclenchement, le choix des paramètres mécaniques, etc. Devant les nombreuses inconnues et incertitudes liées à l'établissement de ces connaissances, qui sont les données d'entrées du modèle, les calculs par épandage doivent être envisagés sous forme paramétrique, ce qui permet de tester la sensibilité des hypothèses envisagées et des paramètres adoptés. Deux niveaux de paramétrage sont mis en œuvre en pratique.

Un premier niveau de paramétrage s'attache à évaluer l'influence de la position de la rupture dans le versant étudié. Pour cela, des scénarios doivent être définis, afin de préciser les zones de départ des masses rocheuses, les volumes mis en jeu, l'étagement des ruptures, etc. Ces différents scénarios entrent dans la modélisation par le biais de lignes de départ L_1, L_2 particulières, définies sur le MNT et auxquelles sont associés des volumes de roche à déverser dans la pente. L'épandage peut être calculé à partir d'une ligne de départ donnée, mais aussi, en séquence, à partir de plusieurs lignes de départ différentes. Il s'agit alors de scénarios étagés, le MNT étant mis à jour à chacune des étapes successives du calcul.

Le second niveau de paramétrage concerne les données mécaniques telles que le frottement ou la vitesse limite, qu'il s'agit de faire varier dans des plages fixées afin de tester l'influence de ces paramètres sur le résultat du calcul d'épandage. Ces paramètres règlent le taux de dissipation de l'énergie pendant la propagation et l'épandage. La vitesse limite se réfère à une vitesse critique qui est elle-même définie pour tenir compte de l'effet de masse. Des volumes élémentaires plus ou moins grands peuvent être adoptés aussi. Dans le modèle de calcul, la possibilité a été donnée d'affecter une vitesse limite différente à chacun des volumes élémentaires, dans l'intervalle $[v_{\text{lim min}}, v_{\text{lim max}}]$, ce qui permet de produire une dispersion supplémentaire des éléments de volume dans l'épandage.

L'exploitation des résultats des calculs est effectuée au moyen de cartes ou de vues en perspective. Il est possible aussi de dresser des profils comparatifs avant et après épandage, dans le versant ou dans la vallée. Si le modèle est utilisé pour délimiter des zones de risques, une bande supplémentaire de sécurité doit être envisagée pour prendre en compte la propagation de blocs isolés, non considérés dans la méthode de calcul. À ce titre, le MNT mis à jour, ou des profils tirés de celui-ci après épandage, peut être utilisé pour des calculs de propagation de blocs avec la nouvelle morphologie du site.

Enfin, il faut mentionner l'intérêt de disposer d'un MNT précis et suffisamment étendu, couvrant le versant et la région d'épandage présumée, pour garantir une meilleure qualité du résultat des calculs. Des MNT à maille $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ ont été utilisés dans les deux exemples présentés ci-après.

APPLICATIONS DE LA MÉTHODE PAR ÉPANDAGE

■ Site de La Clapière

Depuis la fin des années 1970, le versant de La Clapière attire l'attention par la menace qu'il exerce dans la vallée de la Tinée [7, 8, 11]. En fait, des mouvements s'étaient déjà produits dans des périodes antérieures, comme en témoignent des documents plus anciens (cf. le MNT de 1970, **figure 1a** par exemple). L'évolution relativement lente du versant, sans amplification catastrophique, a été marquée par un accroissement rapide des vitesses de déplacement en surface au début des années 1980, le paroxysme de 1987 pour le glissement principal, puis le glissement supérieur (situé au nord-est, cf. **figure 1b**), et enfin une longue période de ralentissement. Quelle que soit l'évolution du glissement principal, la poursuite des déplacements conduit à un déchaussement progressif des escarpements sommitaux et latéraux. La rupture de ces escarpements, puis leur évolution dans la lignée du glissement supérieur, constituent une première famille de mouvements lentement amortis. Une autre famille, plus dangereuse, regroupe les glissements en masse issus des escarpements et se propageant sur le glissement principal à plus grande vitesse pour s'étaler plus ou moins largement dans la vallée. Des modèles de calculs différents ont été appliqués au site pour tenter de décrire l'écoulement de telles masses [12].

La modélisation par épandage a été mise en œuvre en 2000 sur la base des études et de la surveillance effectuées au LRPC de Nice. Les éboulements calculés entrent dans une famille de scénarios intermédiaires entre les glissements lents et les éboulements en très grande masse et mettant en jeu des volumes limités à quelques millions de mètres cubes [10]. Ces volumes mobilisables restent à l'échelle des volumes disponibles en amont des escarpements sommitaux. Huit scénarios ont été envisagés pour les calculs d'épandage, avec des lignes de départ situées sous les escarpements sommitaux ou latéraux ou occupant une position particulière dans le glissement principal.

À titre d'exemple, la **figure 7** montre une vue en perspective du versant de La Clapière et les trajectoires de quelques masses élémentaires (le MNT est représenté en carte des pentes et en niveaux de gris, les trajectoires en jaune). Ces masses se détachent d'une ligne de départ située sous l'escarpement sommital du glissement supérieur. Les masses finissent leur course dans la vallée de la Tinée en aval, après avoir traversé le glissement supérieur et le glissement principal. La **figure 8** montre un calcul de propagation pour des départs situés sous le lobe nord-ouest (à comparer aux cônes de

la **figure 5**). Les volumes initiaux sont respectivement égaux à $1 \cdot 10^6$, $2 \cdot 10^6$ et $5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Le versant est représenté en carte des pentes et en niveaux de gris. Les volumes éboulés sont représentés en couleur (rouge pour les faibles pentes, bleu pour les fortes pentes).

figure 7

Trajectoires élémentaires
calculées sur le versant de
La Clapière.
Vue en perspective de
l'aval vers l'amont de la
Tinée. MNT de 1997.

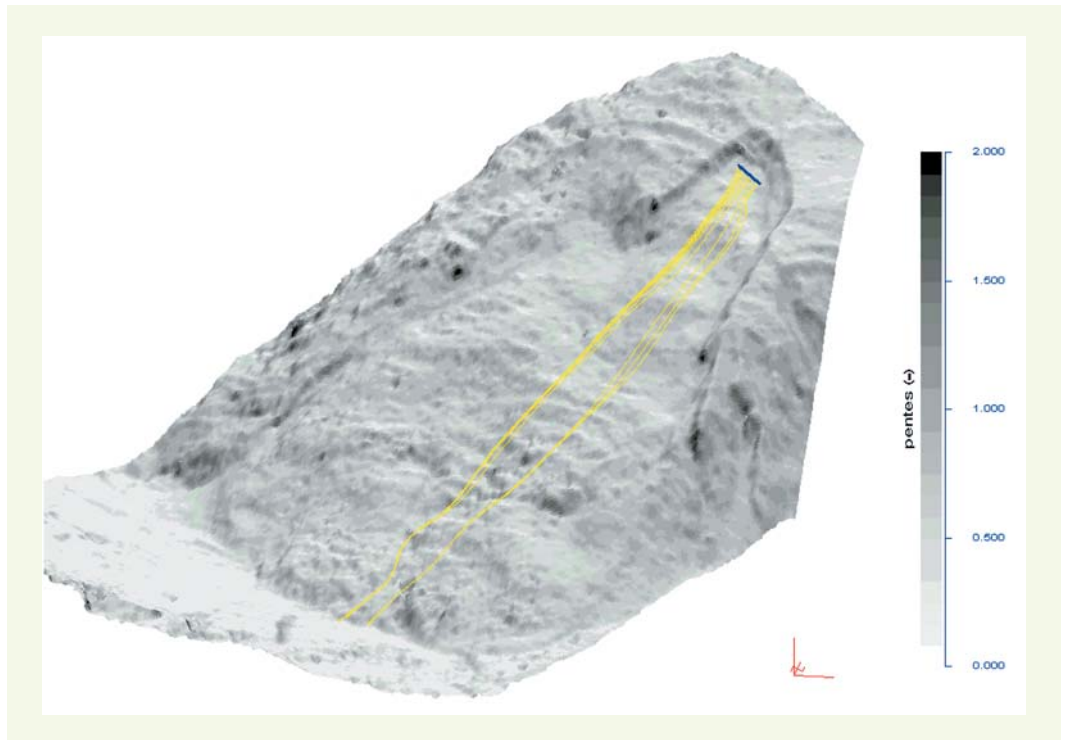
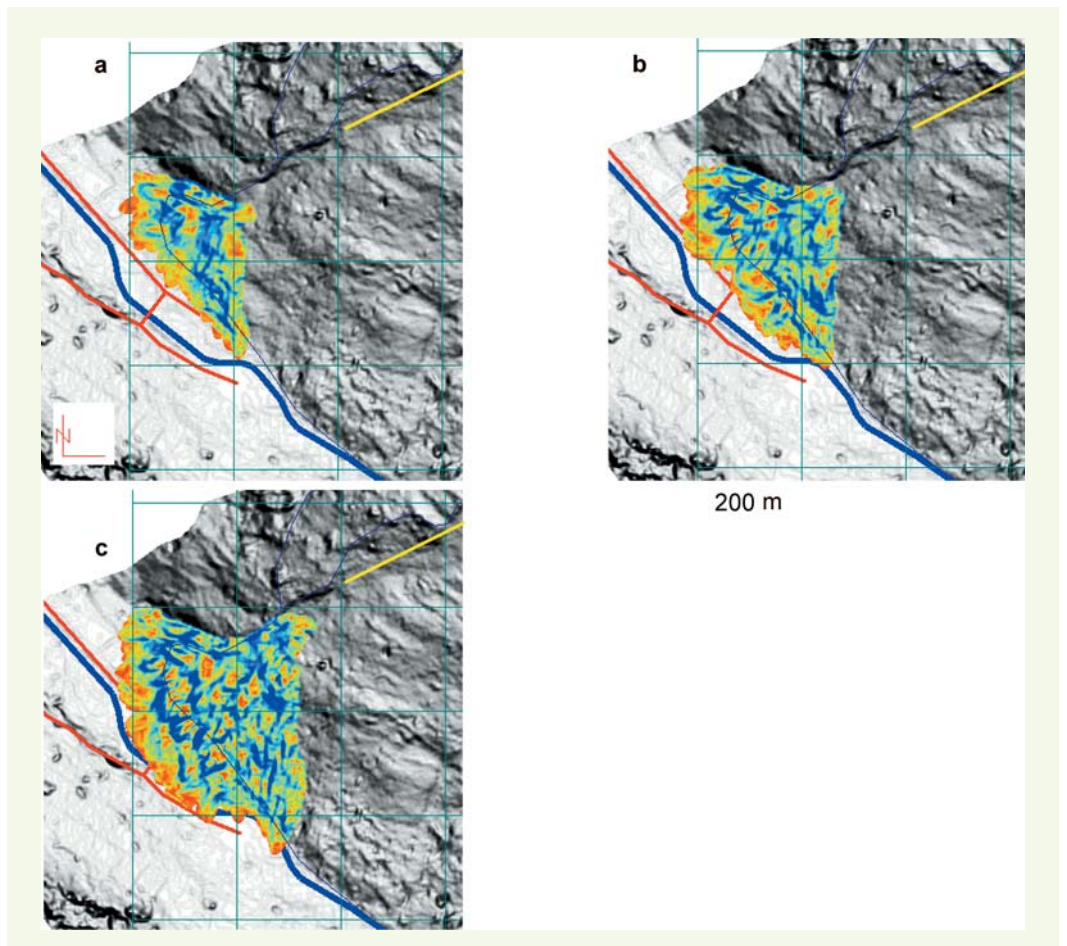


figure 8

Épandages calculés en
pied du versant de La
Clapière (Belloire). Vue
en plan.
a - Volume $1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.
b - Volume $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.
c - Volume $5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.



Il apparaît que la forme finale de la masse éboulée dépend beaucoup des scénarios envisagés et des paramètres de calcul (frottement et vitesse limite) et, pour les faibles volumes, de la morphologie locale du versant. Avec les propagations les plus lentes, les volumes déplacés prennent la forme de cônes de grands rayons de courbure. Il apparaît aussi une tendance à l'accumulation d'une partie des volumes dans le versant ou la dispersion des volumes en plusieurs coulées séparées, en raison de telle ou telle particularité morphologique locale (terrasses, vallons), ce qui indique un certain étalement de la masse propagée et la possibilité qu'offre le versant de retenir une partie de cette masse. L'accumulation progressive des volumes en pied du versant produit un détournement des volumes qui arrivent ensuite, vers l'amont et l'aval de la vallée, perpendiculairement à la trajectoire initiale, comme il est observé souvent dans la nature. Les contours des volumes éboulés adoptent des configurations plus réalistes que les bouchures en forme de cônes (*cf. figure 4*). Mais, comme les cônes, ces contours doivent être élargis pour tenir compte de la propagation de blocs isolés supplémentaires émanant de talus résiduels non stabilisés.

■ Site des Ruines de Séchilienne

L'évolution des désordres observés sur le site des Ruines de Séchilienne constitue une menace dans la vallée de la Romanche [9, 13, 14]. Le modèle par épandage a été mis en œuvre en 2003 sur la base des études et de la surveillance du site effectuées par le LRPC de Lyon. Les calculs ont été réalisés sous une forme paramétrique, en fonction des principaux paramètres mécaniques (frottement, vitesse limite) et pour différents scénarios, afin de simuler des épandages progressifs à forte dissipation et limités à quelques millions de mètres cubes. La zone de départ des masses rocheuses est circonscrite à un secteur situé en amont du couloir des Ruines (zone frontale).

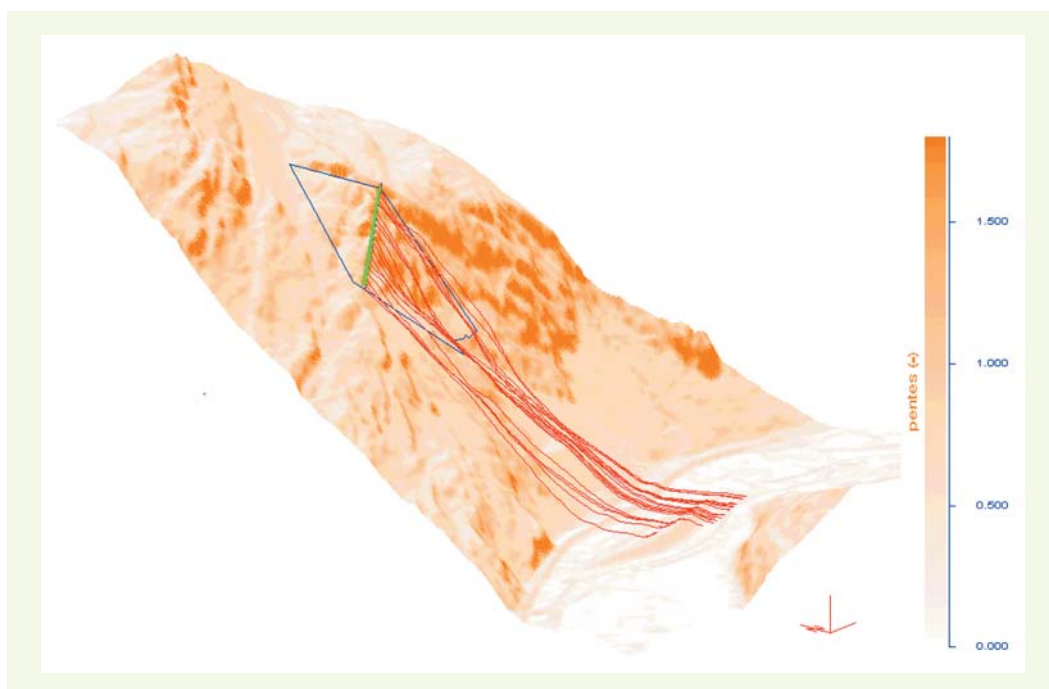
Deux MNT ont été levés sur une photo aérienne de 1994 du site de Séchilienne. Le MNT à maille carrée de 4 m couvre l'ensemble du versant (640 ha, 400 000 points) tandis que le MNT de 2 m de côté couvre la partie inférieure du versant (les Ruines ; 500 ha, 1 250 000 points). Les deux MNT incluent la vallée de la Romanche et le pied du versant opposé. Le MNT de 1997 a été utilisé pour préciser les volumes mobilisables dans différents scénarios, sur la base de la connaissance structurale du massif rocheux.

Les différents scénarios étudiés sont définis par des lignes de départ situées à différentes altitudes dans la zone frontale. Ces lignes ont été subdivisées en deux et trois sous-segments respectivement, pour simuler l'effet d'une extension des désordres de l'est vers l'ouest, la région est de la zone frontale présentant les signes de désordre les plus avancés. À chacune de ces lignes est affecté un volume déduit de l'analyse des volumes disponibles, par pas de $0,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. L'angle de frottement adopté est $\varphi = 25^\circ$, pour des vitesses limites comprises entre 5 à 30 m/s, en retrait des vitesses critiques. Le volume élémentaire est $V_{o,elem} = 1\,000 \text{ m}^3$.

La *figure 9* montre des trajectoires de quelques volumes élémentaires issus d'une ligne de départ située à la rupture de pente de la zone frontale. Le MNT est vu en perspective de l'aval de la Romanche vers l'amont. Il est représenté en carte des pentes et en niveaux de rouge, les trajectoires en rouge foncé, le polygone délimitant la zone frontale en bleu et la ligne de départ en vert. On peut noter le rôle du merlon situé dans la vallée, qui arrête les masses se propageant en aval du site. À faible vitesse limite, quand il y a beaucoup de dissipation interne, les masses suivent le détail de la topographie du versant, en empruntant des couloirs situés entre les monolithes rocheux de la zone frontale, et elles n'atteignent pas le lit de la Romanche. Dans la partie médiane du versant, les trajectoires se concentrent en majorité dans l'axe de l'éboulis principal. Il y a un fort effet de focalisation des volumes élémentaires par le couloir des Ruines, pour aboutir à un mécanisme d'engraisement de l'éboulis actuel. Cet effet est inhérent à la conception du modèle d'épandage utilisé ici, qui ne prend pas en compte l'interaction directe entre les masses élémentaires, sauf dans la phase d'accumulation en fond de vallée. Cet effet s'estompe pour les plus grandes vitesses limites et les scénarios dont la ligne de départ est longue. Pour des vitesses limites plus fortes, les trajectoires sont plus tendues et les domaines d'arrêt plus étendus dans la vallée. Sans dissipation interne, les masses atteignent et remontent le versant opposé.

figure 9

Trajectoires élémentaires
calculées sur le versant des
Ruines de Séchilienne.
Vue en perspective de
l'aval vers l'amont de la
Romanche.



La **figure 10** montre le résultat d'un calcul d'épandage pour un volume initial de $1,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ issu de cette même ligne de départ. Le versant est vu en perspective de l'amont vers l'aval, en carte des pentes et en niveaux de vert, le volume éboulé en couleur (rouge pour les faibles pentes, bleu pour les fortes pentes). Les épandages latéraux vers l'amont et vers l'aval de la vallée résultent de l'accumulation progressive des éléments rocheux, qui a pour effet de détourner les éléments arrivant ultérieurement.

La **figure 11** présente une simulation de scénario étagé où le calcul par épandage est effectué à partir de différentes lignes de départ adoptées successivement. Diverses séquences peuvent être envisagées suivant que les lignes de départ sont activées en partant du haut ou du bas de la zone frontale ou de l'est vers l'ouest. L'enchaînement de ces déclenchements successifs prend une grande importance si, de plus, les propriétés de dissipation changent aussi. Il apparaît ainsi que des masses

figure 10

Épandage calculé en pied
du versant des Ruines de
Séchilienne.
Vue en perspective de
l'amont vers l'aval de la
Romanche.

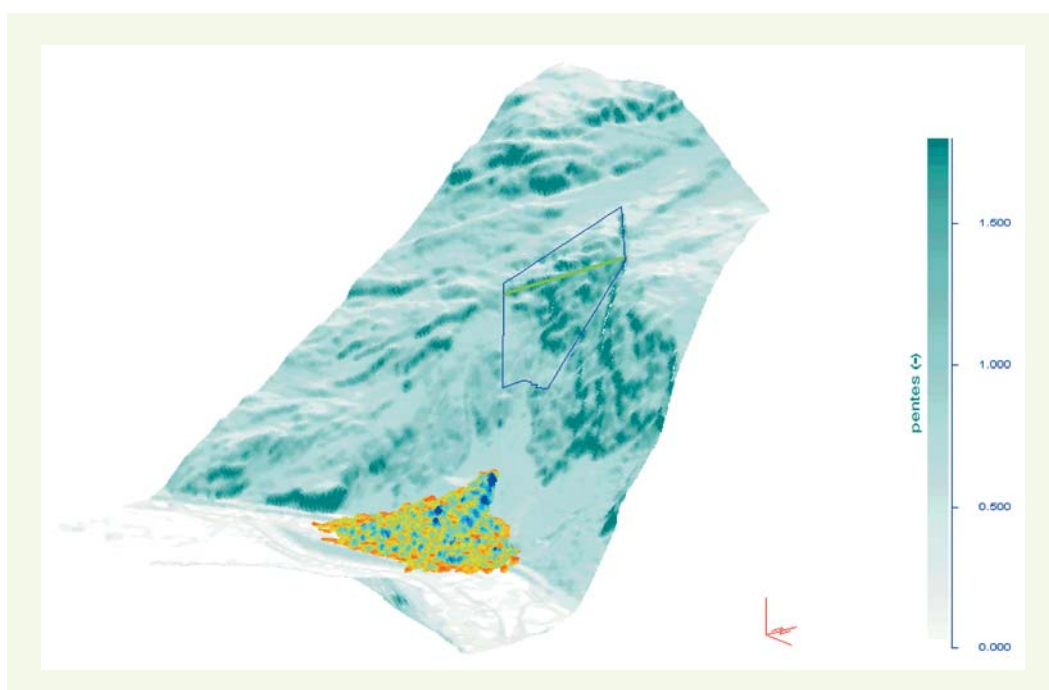
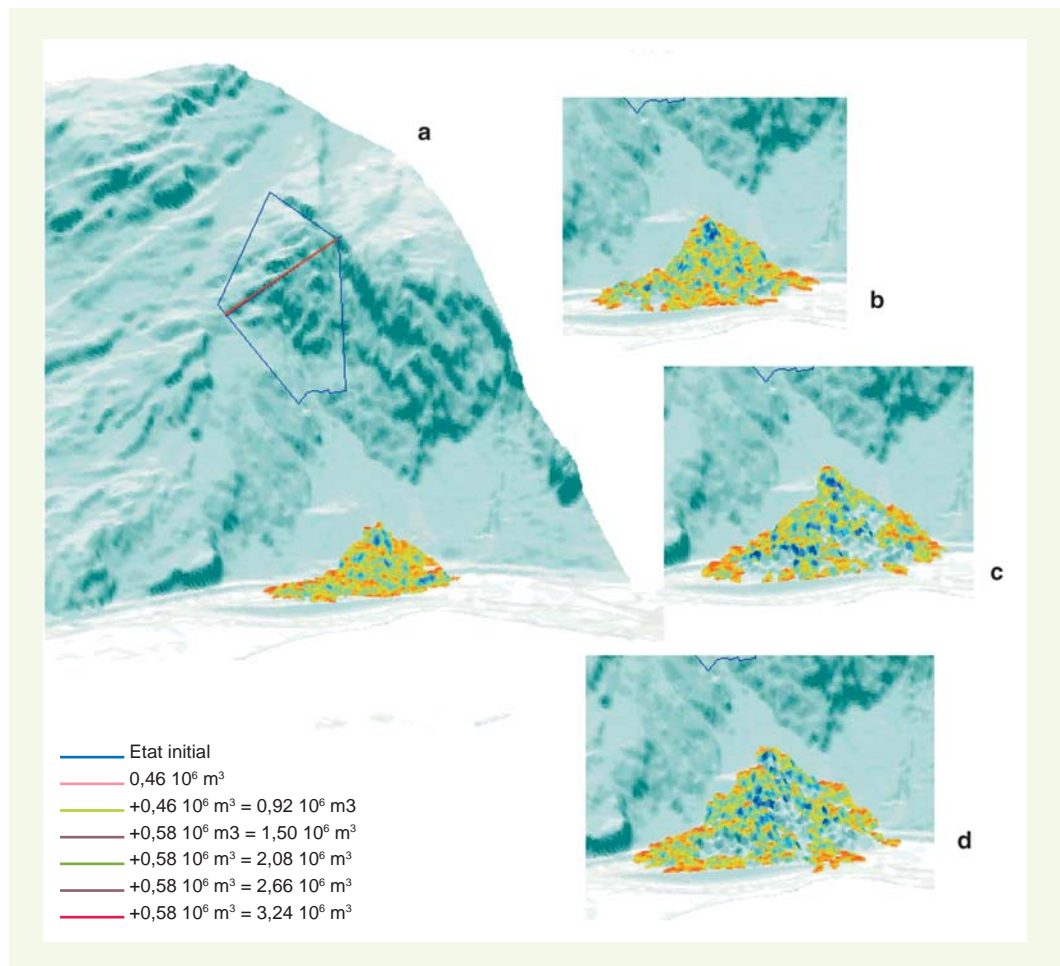


figure 11

Scénario étagé de calcul d'épandage. Versant des Ruines de Séchilienne.
a - Volume $0,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.
b - Volume $1,1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.
c - Volume $1,7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.
d - Volume $2,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.



plus énergétiques arrivant en dernier favorisent un épandage plus vaste. Le recouvrement des débris existants et l'extension des nouveaux arrivants s'effectuent de façon très complexe pendant les scénarios étagés. Cet exemple ne constitue qu'un exemple parmi un grand nombre de cas possibles. Il apparaît un rôle important du merlon qui, malgré son extension limitée vers l'est, permet de retenir des volumes éboulés importants à l'ouest, dans l'hypothèse des éboulements à forte dissipation simulés ici.

Deux profils verticaux ont été définis pour analyser les résultats des calculs d'épandage. Un profil d'azimut N163 relie le sommet de la zone instable à la vallée de la Romanche en passant par l'axe de l'éboulis principal. Un profil N82, quasi perpendiculaire au précédent, emprunte le lit de la Romanche sur une longueur de 800 m environ. La **figure 12** montre l'accumulation progressive des volumes dans ces deux profils. Il s'agit d'un scénario étagé. Les épandages latéraux vers l'amont et vers l'aval de la Romanche apparaissent aussi (**figure 12b**). Les angles de « frottement apparent » φ_a mesurés sur le profil N163 après calcul varient peu, de 30 à 38 degrés, en raison de l'étroitesse de la vallée de la Romanche et parce que les simulations présentées dans cette étude privilégient les fortes dissipations (**figure 12a**).

CONCLUSION

Les éboulements en grande masse se distinguent des chutes de blocs par les mécanismes de déclenchement, de propagation et de dissipation d'énergie au cours du mouvement. La modélisation par épandage vise à simuler des éboulements intermédiaires entre ces deux extrêmes, pour de fortes dissipations et des volumes limités à quelques millions de mètres cubes. Elle s'inscrit dans la chaîne complexe d'analyse des différentes étapes du processus d'éboulements rocheux, pour des applications à des analyses de risque.

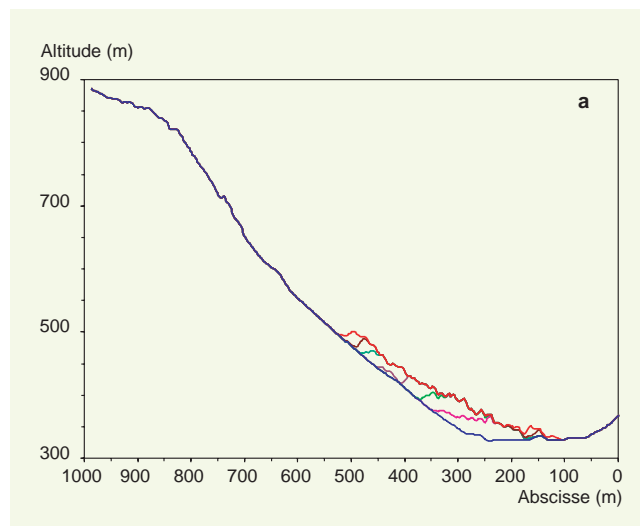
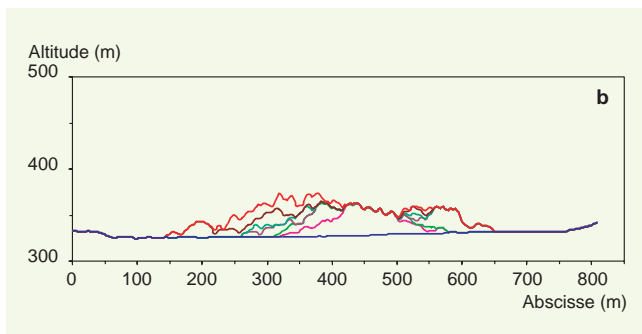


figure 12

Profils des volumes
éboulés. Scénario étagé.
Versant des Ruines de
Séchilienne.
a - Profil nord-sud.
b - Profil est-ouest dans la
vallée de la Romanche.

Les modélisations par épandage sont effectuées à trois dimensions sur un MNT du site étudié, en vue de rechercher la forme finale de la masse éboulée. En pratique, les calculs sont conduits sous forme paramétrique pour différents scénarios de déclenchement ou des scénarios étagés, d'une part, et différents paramètres mécaniques, d'autre part. La dissipation de l'énergie s'effectue par frottement et vitesse limite. Cette vitesse limite est choisie comme inférieure à une vitesse critique qui est caractéristique des éboulements catastrophiques et dans lesquels la dissipation d'énergie diminue avec l'accroissement du volume rocheux en mouvement. Le MNT est mis à jour au fur et à mesure du calcul, ce qui permet d'examiner la forme et l'extension du volume foisonné après étalement (cartes, vues en perspective, profils). Des exemples d'utilisation des MNT dans l'étude des versants instables ont été donnés (comparaison des MNT à des dates successives, bilan de volume, évolution superficielle si des marqueurs sont disponibles et si l'amplitude des déplacements le permet, calculs géométriques de bouchures ou de volumes disponibles avant déclenchement).

Des recherches complémentaires sont prévues pour valider véritablement cette approche numérique à l'aide d'observations et de résultats expérimentaux. Des simulations d'écoulements de graviers en laboratoire et des modélisations de trois sites européens documentés sont ainsi en cours de réalisation, au sein du projet européen Interreg III Rockslidetec.

En s'inscrivant dans la chaîne d'analyses et d'études de risque consacrées à ces sites, les calculs paramétriques par épandage tentent de répondre au mieux aux exigences de ce type de problèmes, devant les nombreuses inconnues et incertitudes relatives aux phénomènes en jeu, en apportant un certain degré de quantification à des tendances souvent décelées de manière intuitive. L'utilisation de ce type de modélisation doit rester inscrite dans le cadre précis de cette chaîne d'analyses et d'études de risque, dans le respect des hypothèses qui président à sa mise en œuvre.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 **HEIM A.**, *Bergsturz und Menschenleben*, Fretz et Wasmuth, Zürich, **1932**, 218 p.
- 2 **SCHIEDERGER A.**, On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides, *Rock Mechanics*, **5**, **1973**, pp. 231-236.
- 3 **Hsü K.J.**, Catastrophic debris streams (sturzstroms) generated by rockfall, *Geol. Society of America Bulletin*, **86**, **1975**, pp. 129-140.
- 4 **ROCHET L.**, Application des modèles numériques de propagation à l'étude des éboulements rocheux, *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, **150/151**, **1987**, pp. 84-95.
- 5 **COROMINAS J.**, The angle of reach as a mobility index for small and large landslides, *Can. Geotech. J.*, **33**, **2**, **1996**, pp. 260-271.
- 6 **FINLAY P.J., MOSTYN G.R., FELL R.**, Landslide risk assesment : prediction of travel distance, *Can. Geotech. J.*, **36**, **3**, **1999**, pp. 556-562.
- 7 **FOLLACCI J.P.**, Les mouvements du versant de La Clapière à Saint-Etienne-de-Tinée (Alpes-Maritimes), *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées*, **150/151**, **1987**, pp. 39-54.
- 8 **FOLLACCI J.P.**, Le glissement de la Clapière (Alpes-Maritimes, France) dans son cadre géodynamique, *Landslides*, Lausanne, **1988**, vol. **2**, pp. 1323-1327.
- 9 **ANTOINE P., CAMPOROTA P., GIRAUD A., ROCHET L.**, La menace d'écroulement aux Ruines de Séchilienne (Isère), *Bulletin de liaison des*

- laboratoires des ponts et chaussées, **150/151**, **1987**, pp. 55-64.
- 10 SERRATRICE J.F.**, Glissement de La Clapière. Comparaison des MNT de 1970 à 1997, Journées de Mécanique des Sols et des Roches des LPC, Nancy, juin **2001**, 19 p.
- 11 FOLLACCI J.P.**, Seize ans de surveillance du glissement de La Clapière (Alpes-Maritimes), Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, **220**, **1999**, pp. 35-51.
- 12 SOUSA J., VOIGT B.**, Computational flow modeling for long-runout landslide hazard assessment, with an example from Clapière landslide, France, Bulletin AEG, **XXIX**, **2**, **1992**, pp. 131-150.
- 13 CHARDON M.**, Géomorphologie et risques naturels : L'éboulement de Séchilienne (Isère) et ses enseignements, Revue de Géographie Alpine, **LXXV**, **1987-3**, pp. 249-261.
- 14 POTHERAT P., ALFONSI P.**, Les mouvements de versant de Séchilienne (Isère). Prise en compte de l'héritage structural pour leur simulation numérique, Revue Française de Géotechnique, **95/96**, **2001**, pp. 117-131.

