

# Avalanches

## de boue et de neige

Christophe ANCEY et Éric BARDOU

Parfois la neige et la terre se mettent à dévaler les pentes sous forme d'avalanches et de laves torrentielles. À force de les observer, de les reproduire en laboratoire et numériquement, on perce quelques-uns de leurs mystères.

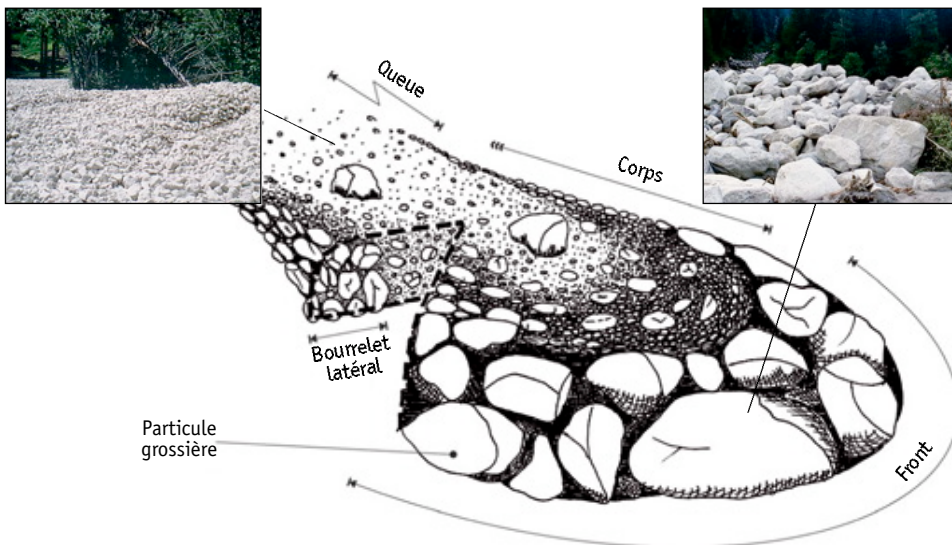
**D**ans les Alpes, la gestion des risques naturels est de la première importance. La préservation du patrimoine devient une préoccupation croissante compte tenu des enjeux économiques. En outre le manque de terrains constructibles a accru notablement la pression foncière. De plus en plus de communes souhaitent aménager des zones soumises à des risques naturels. Des événements récents nous ont rappelé les menaces

auxquelles sont exposées les populations en montagne. À la suite de fortes chutes de neige au cours du mois de février 1999, de nombreuses avalanches se sont produites sur tout l'arc alpin et ont causé la mort de plus de 70 personnes dans leur habitation et des centaines de millions d'euros de dommages. En août 2005, des précipitations intenses s'abattirent sur la Suisse (voir la figure 2), l'Autriche, le sud-est de la France et le sud de l'Allemagne. Elles causèrent des glis-

ssements de terrain et des crues. Localement, les torrents charrièrent d'importantes quantités de terre et de roches, se transformant parfois en coulées boueuses, les laves torrentielles. À Brienz, près de Berne, en Suisse, elles rasèrent plusieurs maisons et tuèrent deux personnes.

Un enjeu fondamental des recherches en risque naturel concerne le développement d'outils pour prédire l'extension des zones d'avalanches et de laves torrentielles. La reproduction des laves torrentielles et des avalanches, en laboratoire ou *in situ* est particulièrement difficile. Lorsqu'on y arrive, la connaissance des conditions initiales et la mesure des caractéristiques dynamiques restent délicates. L'étude des écoulements naturels ne s'appuie donc pas sur une étude expérimentale poussée.

Cependant, on peut appréhender le fonctionnement de ces phénomènes de manière intuitive et donc les modéliser numériquement. Le premier modèle d'avalanches serait dû à l'ingénieur forestier français Paul Mougins en 1922. Il compara la neige à un bloc glissant pour calculer la vitesse d'une avalanche. Pour les laves torrentielles, les premières modélisations datent des années 1980. Elles sont calquées sur les modèles hydrauliques ou d'avalanche. Malgré les perfectionnements, les principes de base restent inchangés : un modèle d'ava-



**1. À L'AVANT D'UNE COULÉE DE LAVE TORRENTIELLE**, le front accumule des gros blocs (d'environ un mètre). Le corps de l'écoulement contient des gros blocs dispersés et la queue de la coulée contient moins de particules solides. Elle est donc moins visqueuse que le reste de la coulée.

lanche ou de lave torrentielle exploite une analogie avec un phénomène connu ; on extrapole les équations du mouvement, et on ajuste les éventuels paramètres avec des événements passés. Dans ces conditions, que vaut l'analogie ? Quel crédit peut-on accorder à des paramètres calés sur des événements passés pour déterminer un événement futur sur un site différent ? Nous verrons que pour étudier les avalanches et les laves torrentielles, l'observation naturaliste, l'expérimentation et la théorie se complètent.

## Observer la neige et la boue

Quand on regarde une avalanche ou une lave torrentielle en mouvement, on est frappé par la fluidité de son déplacement. Or ces matériaux au repos nous apparaissent bien solides. Quelle est leur nature exacte ?

La neige est composée de grains de glace en contact les uns avec les autres. Ces liens lui assurent une certaine cohésion et donc un aspect solide. Dans certaines circonstances, les forces de contact faiblissent. Par exemple, sous l'effet du tassement, des cristaux de neige récente s'arrondissent, le nombre de contacts d'un grain avec ses voisins diminue, et avec lui la cohésion de l'ensemble. Si la pente est suffisante, le manteau neigeux se met en mouvement, c'est l'avalanche.

Dans les premiers instants après la rupture, la neige récente se comporte comme un matériau granulaire. L'avalanche de neige s'apparente alors à un écoulement de sable. Cependant les cristaux sont des structures fragiles et sensibles aux changements de température. Les frottements entre les grains libèrent de l'énergie. Quand cette dissipation est importante, la température des grains augmente et de l'eau liquide apparaît. La neige change radicalement de nature : elle s'agglomère en boules. Si la teneur en eau continue à augmenter, elle prend la consistance d'une pâte humide. Les contacts entre grains deviennent des ponts d'eau liquide, et ils confèrent à la neige un comportement de fluide visqueux.

Au contraire, si l'avalanche accélère suffisamment, elle entraîne de l'air avec elle. Celui-ci s'imisce dans l'écoulement et il le dilue ; il n'y a plus de contact



**2. LES AVALANCHES** détruisent régulièrement des habitations ou emportent des routes (a). Les coulées de boues, à Brienz, en Suisse (b), et les laves torrentielles (c) font de même, comme nous l'a rappelée la montagne l'été dernier. Depuis le début du siècle, les ingénieurs et les techniciens tentent de contrôler les écoulements de neige ou de boue.

solide entre cristaux et la dissipation d'énergie au sein de la masse de neige est considérablement réduite. L'avalanche continue à accélérer et devient de type aérosol (voir *La physique des avalanches*, par M. Naaim, F. Bouvet-Naaim et L. Vidal, dans ce dossier).

Les laves torrentielles sont des mélanges d'eau, de particules fines colloïdales (comme des argiles), et de blocs grossiers (jusqu'à plusieurs mètres de diamètre) (voir la figure 1). La lave torrentielle a parfois pour origine un glissement de terrain : si la pression

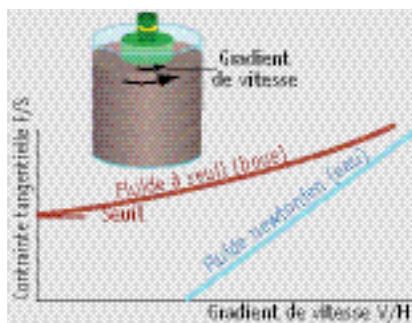
de l'eau interstitielle augmente, alors la résistance mécanique du sol diminue et le glissement de terrain se liquéfie.

Dans d'autres cas, la lave torrentielle est l'œuvre de l'érosion causée par des pluies soutenues. À faible pente, l'eau du torrent entraîne les sédiments, dont l'essentiel de la masse roule au fond du torrent. Lorsque la pente augmente, les sédiments et l'eau se mélangent, formant un matériau boueux. Ainsi, la transformation d'une crue liquide en lave torrentielle est principalement due à la pente. Cependant,

tous les torrents ne génèrent pas de laves torrentielles. La présence de différents types d'argiles influence aussi le comportement mécanique des mélanges.

### Parfois solide, parfois fluide

Nous avons vu que les boues des laves torrentielles et la neige des avalanches sont des suspensions concentrées de



**3. LA RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT** caractérise un fluide. On la mesure par la force de déplacement du cylindre intérieur divisée par sa surface. L'intensité du cisaillement est mesurée par le gradient de vitesse du fluide selon sa distance au cylindre tournant. Pour un fluide tel que l'eau ou la confiture, une toute petite contrainte entraîne un mouvement du fluide. De ce fait, on obtient des flaques d'eau, d'huile et de miel similaires. Pour un fluide à seuil, tel que la boue, le gradient de vitesse ne s'établit – et le fluide ne s'écoule – que si la contrainte est supérieure à une valeur minimale. Un tas de boue ne s'écoule donc pas de lui-même : si la pente n'est pas assez forte, il ne bouge pas.

particules solides de géométrie variée (roches ou boules de neige) dans un fluide (eau ou air). Nous allons voir comment nous étudions leurs propriétés mécaniques en laboratoire, afin de prédire les caractéristiques de leur écoulement.

Dans l'expérience de Couette, on place un matériau dans l'espace annulaire compris entre deux cylindres (voir la figure 3). Seul le cylindre intérieur tourne sur lui-même. Le matériau subit alors un mouvement de cisaillement, entre les cylindres mobile et fixe, et il tend à lui résister. On mesure le couple de frottement exercé sur le cylindre intérieur. À partir de la vitesse du cylindre intérieur et du couple de frottement, on détermine la relation qui existe entre les contraintes et la vitesse de déformation au sein du matériau.

Nous avons testé des mélanges composés d'un fluide – comme de l'huile, de l'eau, ou de l'air –, de particules solides – des billes en verre ou en plastique – et de particules fines colloïdales, qui représentent l'argile. Nous avons observé des variations brutales du comportement des mélanges pour de faibles variations de la composition ou de la vitesse de déformation. Si le mélange comporte un fluide et des billes de verre, il présente un comportement granulaire aux faibles vitesses de rotation : la force de fro-

tement ne dépend pas de la vitesse du cylindre et l'essentiel de la dissipation d'énergie se fait par les contacts entre les particules. Au contraire pour des vitesses rapides, l'inertie du fluide interstitiel augmente, et le liquide s'immisce entre les grains, lubrifiant ainsi les contacts. Le mélange se « liquéfie » et se comporte comme un fluide liquide. C'est ce qui se passe pour les laves torrentielles et les avalanches aérosol.

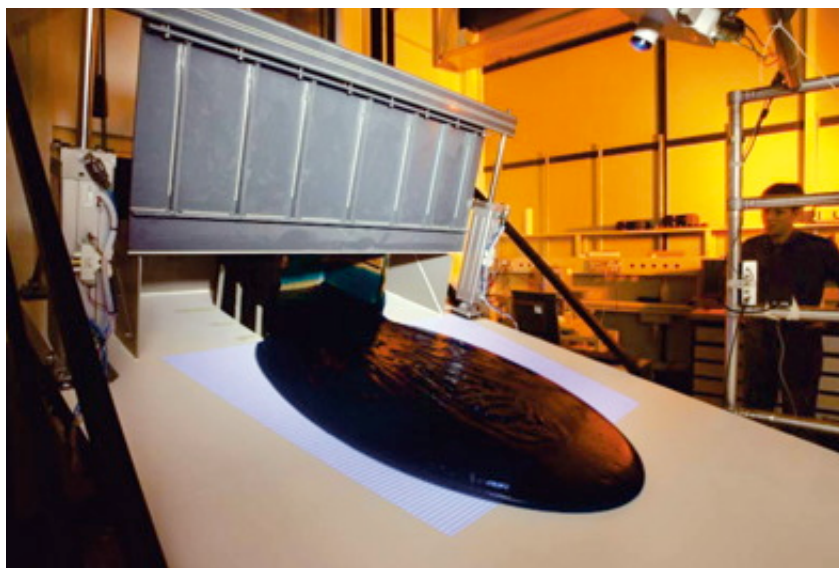
Lorsque l'on ajoute des particules colloïdales, comme de l'argile, le comportement de la suspension devient plus complexe, et il varie avec le temps. Sur des durées de sollicitation très courtes, le matériau se comporte comme un fluide visqueux alors que sur des temps longs, il ressemble à un matériau granulaire. En effet, lorsqu'on le sollicite brièvement, on casse les contacts entre les particules grossières, ce qui provoque la « liquéfaction » du matériau. Quand on sollicite le mélange sur des temps longs, les particules plus lourdes que le fluide interstitiel ont le temps de sédimenter et le fluide compris entre deux particules voisines est expulsé. Le matériau se comporte de nouveau de façon granulaire. Cet effet explique pourquoi certains sols grossiers se mettent à s'écouler une fois ébranlés, puis retournent rapidement à un état solide.

### La rupture de barrage

Connaissant les propriétés mécaniques d'un matériau, on détermine son écoulement. Pour cela, on réalise des expériences dites de « rupture de barrage » : on lâche subitement un fluide sur un plan incliné, puis on suit son évolution au cours du temps.

Nous avons testé différents fluides. Certains ont la consistance du miel. Ils parcourent entièrement le plan incliné. D'autres ont une texture proche de celle du gel pour cheveux, mais en un peu plus dilué. Généralement leur écoulement s'arrête après quelques secondes si la pente est insuffisante.

Sur le plan théorique, le problème de rupture de barrage est très instructif, car le fluide passe par différentes phases qui traduisent des équilibres relatifs, sans jamais atteindre un état d'équilibre complet. Juste après sa libéra-



**4. GRÂCE À L'EXPÉRIENCE DE LA RUPTURE DE BARRAGE,** on étudie la vitesse d'écoulement de mélanges visqueux. Celle-ci peut ne pas être constante dans le temps : au début le matériau s'écoule du fait de la gravité, puis des frottements internes stoppe sa progression, même s'il est toujours en pente.

tion, le fluide se déforme sous l'effet de la gravité. Cette modification de la forme du fluide induit un gradient de pression au sein de l'écoulement dont l'effet est de lutter contre des déformations trop importantes de la surface du fluide. L'écoulement résulte de l'équilibre entre le gradient de pression et l'inertie du fluide.

À long terme, le matériau ralentit fortement sous l'effet d'un nouveau pseudo-équilibre. La dynamique est alors dictée par la gravité, qui est une force motrice tendant à faire descendre le fluide, et par la force de dissipation que sont les frottements, internes ou contre le support. Si la dissipation d'énergie est suffisante, le fluide s'arrête malgré l'inclinaison du plan.

### Des simulations limitées

Simuler numériquement l'évolution du fluide est difficile. Les modèles les plus complets nécessitent plusieurs dizaines d'heures de calcul sur des ordinateurs puissants pour des géométries

d'écoulement et des fluides simples. On développe alors des modèles simplifiés, certes moins précis mais plus rapides pour les applications en ingénierie.

Ces modèles existent à l'heure actuelle, mais les hypothèses introduites pour simplifier le problème induisent parfois des comportements étranges. Dans l'exemple précédent du « lâcher de barrage », on constate expérimentalement que le fluide s'arrête malgré la pente. Selon la plupart des codes numériques, le fluide continue à s'étaler, quoique de plus en plus lentement. Les numériciens utilisent alors des astuces pour arrêter l'écoulement, mais le résultat final diffère significativement selon l'astuce employée. Les modèles numériques ne permettent donc pas un calcul précis de la distance d'arrêt. Cette lacune est handicapante si on souhaite utiliser ces modèles pour délimiter les régions à risque. Selon nous, les méthodes numériques classiques ne permettent pas de calculer précisément la position du front de l'écoulement, car ce dernier est un point particulier

où l'épaisseur de fluide devient nulle, et le calcul diverge.

Quoique très rudimentaires, les modèles actuels parviennent à prédire les principales caractéristiques des avalanches et des laves torrentielles de façon suffisante pour un grand nombre de problèmes en ingénierie. L'enjeu des nouvelles recherches est de proposer des hypothèses mieux fondées physiquement pour améliorer les simulations.

**Christophe ANCEY** est professeur de mécanique des fluides à l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) et chercheur au Laboratoire d'hydraulique environnementale (LHE). **Éric BARDOU** est assistant de recherche à l'Institut de géomatique et d'analyse du risque (IGAR) de l'Université de Lausanne (UNIL).

C. ANCEY, *Dynamique des avalanches*, Presses Polytechniques Universitaires Romandes, 2006.  
R.M. IVERSON, *The physics of debris flows*, in *Reviews of Geophysics*, vol. 35, pp. 245-296, 1997.  
P. COUSSOT, Q.D. NGUYEN, H.T. HUYNH, et D. BONN, *Avalanche behavior in yield stress fluids*, in *Physical Review Letters*, vol. 88, p. 175501, 2002.

**Organisme public de recherche,  
le Cemagref recrute**

**52** (chercheurs  
ingénieurs  
techniciens)

**dans les domaines  
de l'eau  
des territoires  
des déchets  
des écotechnologies  
des risques naturels**

Le Cemagref est un organisme de recherche sur la gestion durable des eaux et des territoires.

Établissement public à caractère scientifique et technologique (EPST), il est placé sous la double tutelle des ministères chargés de l'agriculture et de la recherche.

Le Cemagref emploie 1350 personnes dont 900 permanents pour moitié chercheurs et ingénieurs, répartis en 29 unités de recherche sur 9 sites principaux.

Pour retirer votre dossier et prendre connaissance des modalités de recrutement : [www.cemagref.fr/recrutement](http://www.cemagref.fr/recrutement)

**Cemagref**  
25  
ans  
1981-2006