

La durée entre chacune de ces bouffées est de l'ordre de quelques minutes. Le nombre de bouffées, généralement de quelques unités, peut atteindre plusieurs dizaines. Dans la ravine Jiangjia, en Chine, en juin 1966, 126 bouffées de 665 à 24 600 mètres cubes ont été enregistrées pendant cinq heures. Ces vagues de boue ont plusieurs mètres de haut, une densité supérieure à deux, et avancent sur des fronts de plusieurs centaines de mètres de large, à une trentaine de kilomètres à l'heure. La ravine Jiangjia produit en moyenne dix laves torrentielles par an. Aussi, la vallée de la rivière Xiaojiang, affluent du fleuve Yang-tsé, où aboutissent cette ravine et d'autres « torrents à laves », est recouverte de boues séchées de plusieurs dizaines de mètres de haut le long de plusieurs dizaines de kilomètres. Le seul moyen de voyager au fond de cette vallée est la marche.

La vitesse de la lave varie en fonction de la pente : du haut bassin, où l'on trouve des pentes de l'ordre de 100 pour cent, au cône de déjection, dont la pente varie aux alentours de dix pour cent, la vitesse décroît de plusieurs mètres par seconde à l'arrêt complet.

Les laves torrentielles surviennent lors d'orages violents et localisés. Le mélange boueux et/ou rocaillieux qui s'écoule dans le lit du torrent parvient jusqu'à la vallée, parcourue par la rivière torrentielle. Là, un pont, un coude du canal ou un rétrécissement de la largeur du lit du torrent poussent la lave à sortir du lit pour s'épancher

sur le cône de déjection. Ce cône est formé de l'ensemble des sédiments amenés par les torrents dans la vallée, très souvent fertile, et la population s'y installe volontiers en dépit des risques encourus.

Des conséquences souvent catastrophiques

La boue envahit alors des maisons, submerge une route ou une voie ferrée. Les dépôts boueux qui stagnent momentanément dans le lit du torrent sont lavés et emportés par la queue de la lave, constituée d'un mélange d'eau et de sédiments plus liquides, ou par les écoulements hyperconcentrés lors des crues suivantes. Au contraire, les laves arrêtées sont difficiles à mouvoir, et des couches épaisses de matériau s'arrêtent sur des pentes supérieures à quelques pour-cent.

Les matériaux sortis du lit et arrêtés sur le cône de déjection ne se remettent pas en mouvement d'eux-mêmes et ne sont pas non plus évacués par l'érosion progressive due aux eaux de ruissellement : du fait de la présence d'argile, ils forment une masse compacte, relativement imperméable, dure après séchage, et de forte densité.

À partir de 1965, les voies d'accès à la vallée de la Maurienne ont été coupées régulièrement pendant plusieurs années par des coulées provenant du torrent de Pontamafrey. En 1981, une lave torrentielle dans le torrent de la Ravoire, près de Bourg-Saint-Mau-

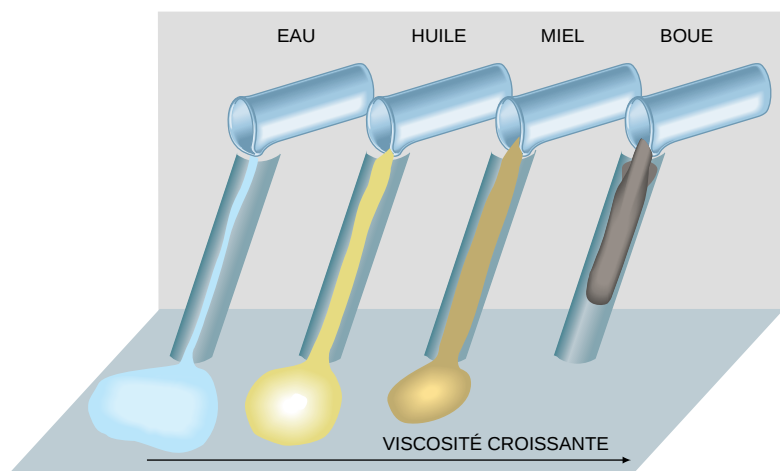
rice a coupé la ligne de chemin de fer et plusieurs routes, dont celle menant à la station des Arcs. En 1987, la zone industrielle de Modane a été envahie par une lave torrentielle (voir la figure 1). En 1995, 21 laves torrentielles « ordinaires » se sont déversées dans 9 torrents différents dans la seule vallée de la Maurienne. Pendant l'été 1995, des laves torrentielles se sont répandues sur la station de ski de Serre-Chevalier, emportant de nombreuses voitures et envahissant plusieurs maisons. Enfin, en juillet 1996, une lave du torrent de l'Arbonne a coupé la route et la voie ferrée conduisant à Bourg-Saint-Maurice.

Si, en France, on déplore très rarement des victimes, les laves torrentielles sont plus meurtrières en Chine et au Japon. Au Japon, où la densité de population est forte, les laves torrentielles causent en moyenne 100 morts par an. En Chine, en 1980, un train reliant Kunming à Chengdu a été happé par une lave torrentielle, ce qui a causé la mort de 300 personnes.

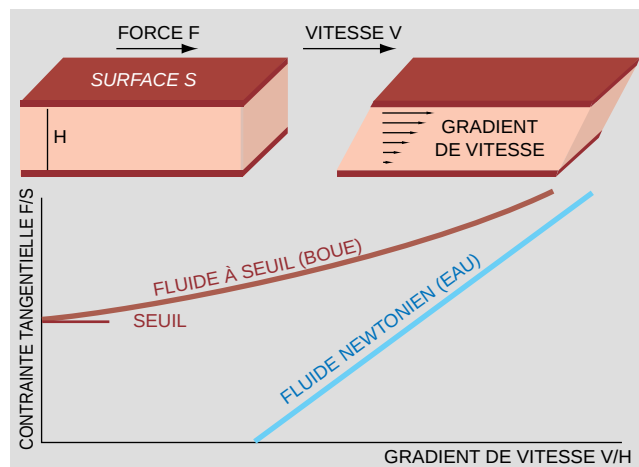
Le mode de déclenchement

Les laves torrentielles sont constituées d'eau, qui provient directement ou indirectement de pluies (après que l'eau a séjourné un temps plus ou moins long dans le sol), et de sédiments, qui sont arrachés à la surface du bassin versant.

On pourrait penser que les laves torrentielles sont déclenchées par un glissement de terrain qui, au cours de



3. DIFFÉRENTS FLUIDES s'écoulent différemment en fonction de leur viscosité (à gauche). Lorsque la viscosité augmente, la vitesse d'écoulement diminue et le niveau atteint par le fluide dans le canal augmente, jusqu'à éventuellement déborder. Un matériau est caractérisé par sa résistance au cisaillement, mesurée par la force de déplacement d'un plateau divisée par sa surface (à droite). L'intensité du cisaillement pour une contrainte tangentielle donnée est mesurée par le gradient de vitesse. Pour un fluide newtonien tel que l'eau ou



la confiture, une toute petite contrainte entraîne un mouvement du fluide. De ce fait, en attendant suffisamment longtemps, 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. Ainsi les laves torrentielles peuvent s'arrêter à mi-pente.

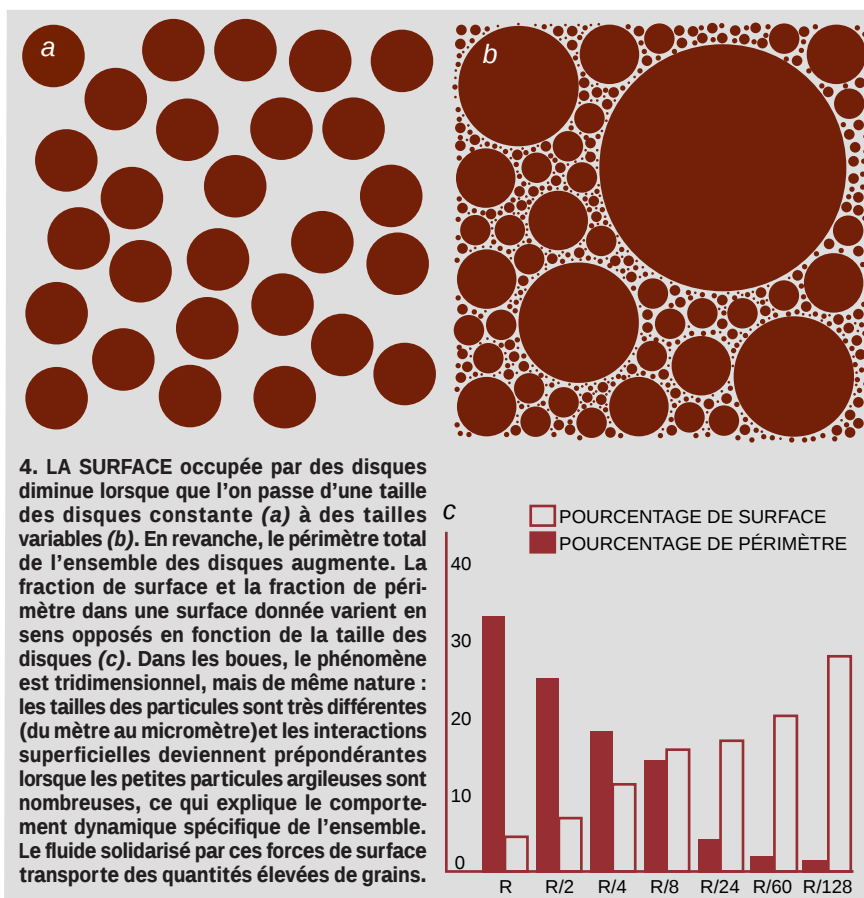
son mouvement, et par addition d'eau, formerait un fluide boueux. Cependant, lorsqu'on explore un bassin versant immédiatement après une lave torrentielle, comme l'ont fait Didier Richard et Emmanuel Bossan dans les Alpes durant l'été 1992, on ne trouve pas de zone de départ de matériau bien identifiée qui aurait fourni l'essentiel du volume de la lave. L'ensemble du bassin, notamment le lit et les berges du torrent et de tous les ravins affluents, sont assez uniformément érodés. Localement, on observe les traces de petits glissements de terrain ou des effondrements de berges, mais il faut cumuler l'ensemble de ces phénomènes pour obtenir le volume de lave qui aboutit dans la vallée.

Ainsi la formation d'une lave résulte, semble-t-il, de l'érosion de tout un bassin versant, sans que l'on distingue une cause prédominante. Une lave torrentielle se forme lorsqu'un ensemble de conditions critiques sont réunies : série de glissements de berges d'assez grande ampleur, conjonction de plusieurs écoulements très chargés en matériaux solides venant des berges ou des affluents du torrent principal, formation puis rupture brutale d'une retenue permettant l'accumulation, puis le départ brutal, d'une grande masse de matériaux solides, etc. La corrélation systématique de ces paramètres pour décrire les situations favorables à la formation de laves semble pour l'instant hors de portée des spécialistes.

Durant les 30 dernières années, les chercheurs se sont surtout intéressés à la prédiction des caractéristiques d'écoulement de ces laves. Ces travaux tendent à délimiter les zones susceptibles d'être atteintes par des coulées, ou à concevoir des ouvrages capables de les stopper ou de les détourner. En France, l'équipe de recherches dirigée par Maurice Meunier étudie le problème depuis une dizaine d'années au Cemagref de Grenoble. À son initiative, des moyens importants de caractérisation du matériau et d'études des écoulements ont été mis en œuvre. Une plate-forme torrentielle unique au monde a été construite au Laboratoire d'hydraulique de France (voir la figure 5).

Des grains de toutes tailles

Quelles sont les propriétés caractéristiques du matériau constituant les coulées de boue. Ce sont des mélanges très



visqueux constitués d'eau, d'argiles, de limons, de sables, de cailloux et de rochers ; toutes les tailles de sédiments, du plus petit (argile) au plus grand (bloc rocheux de quelques mètres de diamètre), sont représentées. Des blocs énormes de quelques dizaines de mètres cubes peuvent être transportés par la coulée : au Japon, un bloc de 3 000 tonnes (plus de 1 000 mètres cubes) a été déplacé sur plusieurs kilomètres. Des blocs dont le diamètre est de l'ordre du mètre semblent flotter à la surface de l'écoulement, portés non seulement parce que le matériau qui s'écoule est très visqueux, mais aussi parce que la différence de masse volumique entre ce bloc et le mélange qui l'entoure est faible.

On observe ces mouvements rapides de tels mélanges boueux dans d'autres domaines : effondrements ou glissements sous-marins, vases mobilisées par des vidanges de barrage, boues de forage, boues résiduaires, charbon liquide. Dans tous ces cas, ces écoulements de fluides sont composés de trois ingrédients principaux : un liquide (essentiellement de l'eau), des particules solides très fines (colloïdales) et de grosses particules

solides. Le comportement mécanique du mélange dépend de la quantité relative de ces trois composants.

La caractéristique commune de tels fluides est leur concentration solide (rapport du volume occupé par le solide et du volume total, eau plus solide) très élevée : pour les laves torrentielles, elle peut dépasser 85 pour cent.

Ce résultat est à rapprocher de la fraction solide maximale d'un mélange compact de sphères rigides, 74 pour cent, et de celle d'un mélange désordonné, 60 à 64 pour cent. À ces concentrations, le mélange de sphères est un solide, sauf quand on parvient à abaisser la fraction solide, auquel cas il peut s'écouler. C'est le phénomène de dilatance des matériaux granulaires, découvert par Reynolds à la fin du siècle dernier : au sein des tas de sable, pour bouger les uns par rapport aux autres, les couches de grains doivent s'écarter légèrement, ce qui diminue la concentration solide moyenne.

La concentration courante d'une lave torrentielle, dont les éléments solides sont disposés « en vrac » au sein d'un fluide qui ne peut se dilater nota-

blement, paraît étonnamment élevée. Il est ainsi surprenant qu'un tel matériau s'écoule aussi rapidement.

Et pourtant elles coulent

L'explication de ce phénomène est «l'étalement granulométrique» des particules solides : celles-ci ont un diamètre entre un dixième de micromètre et quelques mètres, toutes les classes intermédiaires étant à peu près également représentées. Avec cette granulométrie étalée, des petits grains peuvent s'insérer dans les vides entre les gros grains entassés, et ainsi de suite jusqu'à des tailles de l'ordre du micromètre. Il en résulte un important volume solide relatif.

Le mélange boueux (au sens large) constitutif de la lave torrentielle se déforme à peu près continûment et inexorablement, comme un fluide homogène (pour autant, toutefois, que la plupart des blocs présents dans la lave aient un diamètre faible devant la largeur du canal d'écoulement). Cependant un volume égal d'eau et de boue s'écoule très différemment dans un canal, car les résistances internes (les interactions entre les particules constitutives des matériaux) diffèrent. L'eau est (en général) un fluide beaucoup moins visqueux que la boue. Précisons donc ce que nous entendons par viscosité.

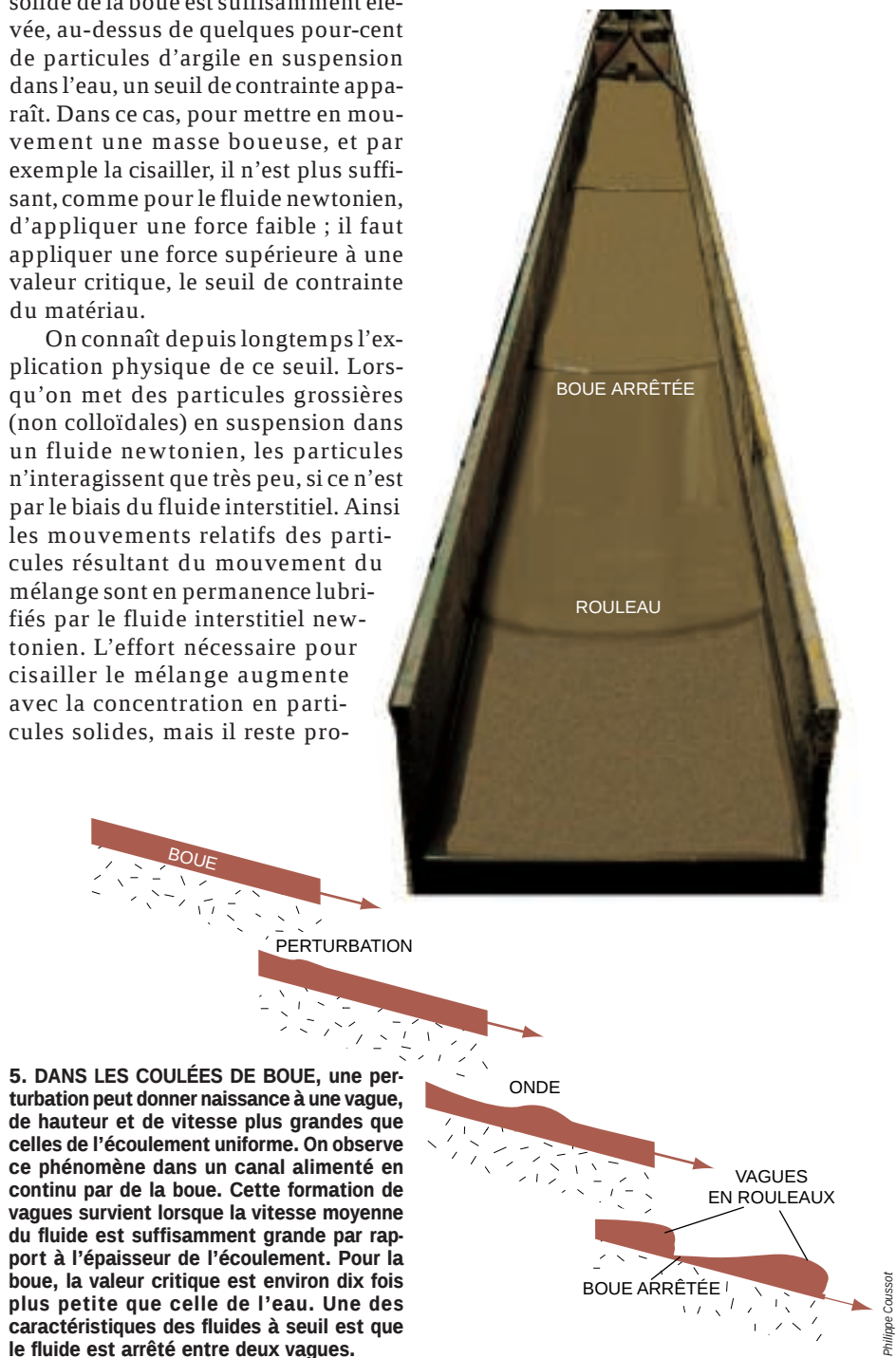
Au contraire d'un solide, qui subit des déformations limitées, un fluide s'écoule. Pour les fluides les plus simples (newtoniens), l'effort appliqué pour obtenir un mouvement est proportionnel à la vitesse de cisaillement du fluide. Lorsque deux plaques rigides sont séparées par un fluide newtonien, on les fait glisser l'une par rapport à l'autre en exerçant une force tangentielle sur les plaques proportionnelle à la vitesse souhaitée. Dans ce cas, la contrainte tangentielle (force/surface) est égale au gradient de vitesse (vitesse/épaisseur de fluide) multiplié par la viscosité du fluide, indépendante de la vitesse pour un tel fluide (voir la figure 3). C'est cette viscosité qui détermine les caractéristiques des écoulements newtoniens. Pour de nombreux fluides, en particulier pour les laves torrentielles, le modèle newtonien n'est pas valable, et la loi de comportement est plus complexe.

Dans des conditions extérieures fixées, un fluide coule d'autant plus

rapidement qu'il est moins visqueux. Seul l'équilibre entre les sollicitations extérieures et la tension superficielle peut permettre à un liquide de s'arrêter. Le cas de la boue (et d'autres suspensions comme les peintures, les encres, le béton frais) est singulier (voir la figure 5) : lorsque la contrainte extérieure due à la gravité diminue, la masse boueuse s'arrête au lieu de ralentir, même sur de fortes pentes. Le mouvement ne se continue que si les forces appliquées sont supérieures à un certain seuil. Lorsque la concentration solide de la boue est suffisamment élevée, au-dessus de quelques pour-cent de particules d'argile en suspension dans l'eau, un seuil de contrainte apparaît. Dans ce cas, pour mettre en mouvement une masse boueuse, et par exemple la cisailer, il n'est plus suffisant, comme pour le fluide newtonien, d'appliquer une force faible ; il faut appliquer une force supérieure à une valeur critique, le seuil de contrainte du matériau.

On connaît depuis longtemps l'explication physique de ce seuil. Lorsqu'on met des particules grossières (non colloïdales) en suspension dans un fluide newtonien, les particules n'interagissent que très peu, si ce n'est par le biais du fluide interstitiel. Ainsi les mouvements relatifs des particules résultant du mouvement du mélange sont en permanence lubrifiés par le fluide interstitiel newtonien. L'effort nécessaire pour cisailer le mélange augmente avec la concentration en particules solides, mais il reste pro-

portionnel au gradient de vitesse. En revanche, dans les laves torrentielles, les particules d'argile (colloïdales) peuvent interagir à travers le fluide interstitiel, même lorsque la suspension est au repos. Lorsque la concentration en particules solides est suffisamment grande, les particules d'argile forment un réseau continu d'interactions d'un bout à l'autre de l'échantillon. Pour briser ce réseau, et donc mettre en mouvement le mélange, il faut appliquer une force minimale, le seuil de



5. DANS LES COULÉES DE BOUE, une perturbation peut donner naissance à une vague, de hauteur et de vitesse plus grandes que celles de l'écoulement uniforme. On observe ce phénomène dans un canal alimenté en continu par de la boue. Cette formation de vagues survient lorsque la vitesse moyenne du fluide est suffisamment grande par rapport à l'épaisseur de l'écoulement. Pour la boue, la valeur critique est environ dix fois plus petite que celle de l'eau. Une des caractéristiques des fluides à seuil est que le fluide est arrêté entre deux vagues.

contrainte du matériau. Bien entendu, ce seuil augmente avec la concentration solide, car le réseau devient de plus en plus serré. De nombreux chercheurs ont constaté que cette augmentation se faisait selon une loi de puissance. Ce résultat est à peu près expliqué (par la théorie de la percolation) pour des concentrations proches de la concentration critique correspondant à l'apparition d'un seuil, mais reste mystérieux pour des concentrations nettement supérieures. Or le matériau constitutif des laves torrentielles ne contient pas seulement de l'eau et de l'argile, mais aussi des grains de toutes tailles. La plupart du temps, la fraction eau-argile seule est un fluide à seuil. La lave complète incluant les grains est un fluide de même type avec un seuil de contrainte qui augmente avec la concentration solide totale. Tant que la concentration solide n'est pas trop grande, les grains sont isolés les uns des autres par des couches plus ou moins épaisses de mélange eau-argile. Celui-ci forme une matrice continue où existe encore le réseau d'interactions entre particules d'argile, ce qui explique l'existence du seuil de contrainte du mélange eau-argile-grains. En revanche, il n'existe pas encore de théorie pertinente expliquant l'augmentation du seuil avec la concentration solide en grains ajoutés.

À concentration solide égale, la granulométrie fixe la viscosité : celle-ci est d'autant plus grande que la fraction de particules colloïdales (argileuses) est grande.

Lorsque le nombre de grains ajoutés est trop grand, beaucoup d'entre eux peuvent entrer en contact plus ou moins direct. Du coup, le comportement mécanique du mélange n'est plus dicté essentiellement par la matrice de boue fine qui enrobe tous les grains, mais par les contacts entre grains. Les physiciens étudient ces milieux granulaires plus intensément depuis quelques années. On sait notamment que, lorsqu'une masse de grains secs s'écoule sur un plan incliné à très grande vitesse, la «viscosité» du mélange est réglée par les collisions entre les particules. En revanche, dans un matériau granulaire du type laves torrentielles, où les grains restent en contact les uns avec les autres parce qu'ils sont tous englués dans un mélange liquide-solide, d'autres théories sont nécessaires, qui n'ont

pas encore été établies ou vérifiées. On sait cependant d'ores et déjà qu'il faut tenir compte de divers phénomènes : les grains peuvent frotter les uns contre les autres, entrer en collisions ou être animés d'un mouvement relatif lubrifiés par du fluide interstitiel. En s'appuyant entre autres sur les raisonnements ci-dessus, en vue d'applications sur le terrain, nous avons, au Cemagref, décidé de distinguer deux catégories principales de matériaux du point de vue mécanique : «granulaires» si la fraction solide critique qui induit un grand nombre de contacts entre les grains est dépassée ; «boueux» dans le cas contraire.

Modélisation des écoulements

C'est dans le domaine des fluides dits boueux que nous disposons actuellement des meilleures modélisations d'écoulement. Le seuil de contrainte est leur caractéristique essentielle et explique un certain nombre de leurs propriétés, notamment les dépôts épais de boue qui stagnent sur de relativement fortes pentes.

Par ailleurs, une instabilité hydrodynamique de type vague se manifeste aussi. Comme dans n'importe quel fluide, lorsque l'épaisseur du fluide est suffisamment faible et sa vitesse suffisamment forte, l'écoulement se déstabilise et se transforme en vagues déferlantes. Une petite perturbation de l'écoulement (variation de la rugosité du fond du canal, léger rétrécissement, etc.) provoque une ondulation de la surface libre de l'écoulement (en contact avec l'air), dont l'amplitude s'accroît jusqu'à occuper toute la hauteur de l'écoulement (voir la figure 5). L'écoulement permanent, uniforme au départ, se transforme en une succession de vagues plus rapides et plus hautes que l'écoulement initial. Finalement il existe souvent une gamme très étroite de pentes pour lesquelles un écoulement de boue est uniforme : au-dessous d'une pente critique, il n'y a pas d'écoulement, du fait du seuil de contrainte du fluide, au-delà d'une pente critique, à débit fixé, les vagues déferlantes apparaissent. Or ces deux pentes sont relativement proches.

Ces vagues augmentent le potentiel destructeur des écoulements de laves torrentielles. Par ailleurs, le

phénomène pourrait être à l'origine de la formation des bouffées successives observées dans les torrents.

On peut ensuite entrer dans le domaine de la modélisation des écoulements réels, à l'aide de modèles numériques notamment. Cela constitue par exemple l'objet des travaux d'équipes telles que celle de P.Y. Julien, à Fort Collins, aux États-Unis, ou D. Laigle au Cemagref, à Grenoble. Les modélisations effectuées permettent d'ores et déjà de prédire les zones susceptibles d'être touchées par d'éventuelles laves torrentielles dans les vallées. On a pu aussi réaliser des modèles réduits en similitude des écoulements naturels, de la même manière que l'on réalise des maquettes pour étudier le mouvement dans l'air ou dans l'eau des avions ou des bateaux. Cela a permis par exemple d'étudier la forme à donner à des ouvrages permettant le passage de torrents au-dessus de l'autoroute de la Maurienne actuellement en construction. Cette étude a été réalisée au travers d'une collaboration entre des bureaux d'études (HYDRATEC et SOGREAH) et avec l'aide d'un laboratoire de recherches (Cemagref). Ces modèles permettront aussi d'étudier l'impact des laves sur les ouvrages construits dans les torrents. Ce n'est plus le diable qui dirige les coulées de boue!

Archimède, émission scientifique de la Sept-ARTE, présentera *Les coulées de boue*, mardi 18 novembre 1997, à 20 h.

P. COUSSOT a été chercheur à la Division Protection contre les érosions au Cemagref de Grenoble. Il est actuellement chef de projet IRM (Imagerie par résonance magnétique) au Laboratoire des matériaux et des structures du génie civil, à Champs-sur-Marne.

P. COUSSOT, *Mudflow Rheology and Dynamics*, IAHR monograph, Balkema, Rotterdam, 1997.

P. COUSSOT, *Les laves torrentielles. Connaissances de base à l'usage de l'ingénieur*, Coll. Études, Cemagref, 23, 1996.

S.B. SAVAGE, *The mechanics of rapid granular flows*, Adv. Appl. Mech., 24: 289-366, 1984.

T. TAKAHASHI, *Debris flow*, IAHR monograph series, Balkema, Rotterdam, 1991.

H. Van DAMME, E. LEMAIRE et P. LEVITZ, *La physique de la boue*, Pour la Science, septembre, 1991.
