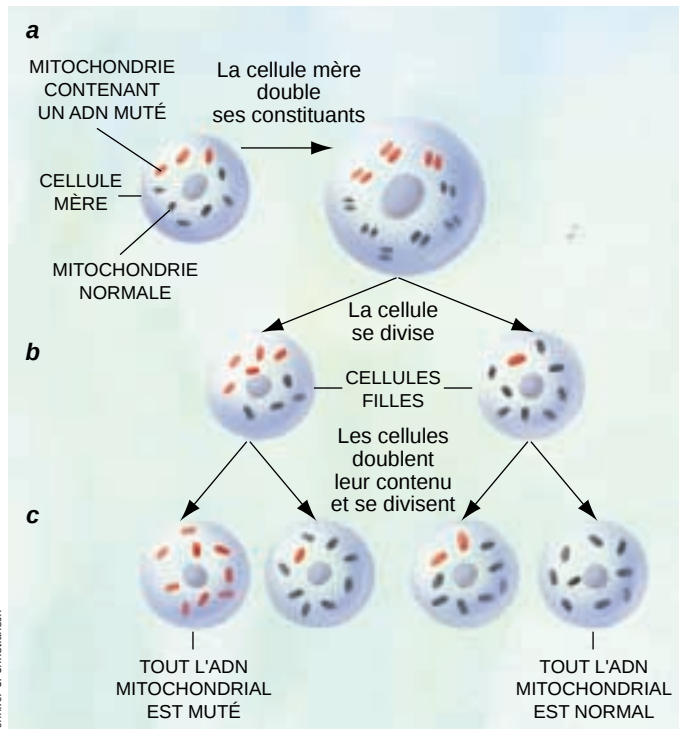


de mutations somatiques de l'ADN mitochondrial.

Certains diabètes sucrés de l'adulte résulteraient aussi d'anomalies mitochondriales. Les personnes atteintes de cette maladie sécrètent de l'insuline, mais en quantité insuffisante pour les besoins de l'organisme. Or ce diabète est héréditaire, et c'est souvent la mère qui transmet la maladie (comme pour les maladies d'origine mitochondriale). En outre, on connaît déjà des mutations de l'ADN mitochondrial (des réarrangements et des substitutions de bases) qui engendrent un diabète sucré (d'autres mutations peuvent bien sûr avoir le même effet). Certaines mutations de l'ADN mitochondrial pourraient réduire la production d'énergie, privant ainsi les cellules sécrétant l'insuline de l'énergie nécessaire à la synthèse de cette molécule.

On pense aussi que, chez des patients souffrant d'athérosclérose, l'insuffisance cardiaque est renforcée par la multiplication des mutations somatiques de l'ADN mitochondrial. Lorsque les plaques d'athérome se déposent sur les parois des artères, elles provoquent des occlusions temporaires, de sorte que le cœur est privé d'oxygène : la chaîne respiratoire cesse de fonctionner, mais elle libère des radicaux libres au moment où la circulation sanguine et l'oxygénation sont rétablies. Cet afflux de radicaux libres endommage l'ADN mitochondrial dans le muscle cardiaque et limite la production d'ATP disponible pour sa contraction. On observe effectivement une proportion anormalement élevée de lésions de l'ADN mitochondrial chez les patients dont le cœur a été reperfusé après un arrêt temporaire de la circulation.

Des études faites sur des rongeurs confirment qu'une accumulation rapide de mutations dans l'ADN mitochondrial accélère le vieillissement : les animaux soumis à une restriction calorique restent en bonne santé et vivent plus longtemps que ceux nourris sans restriction. Or ces animaux



3. UNE CELLULE contenant des mitochondries dont l'ADN muté et d'autres avec de l'ADN normal (a) engendre souvent des cellules filles qui diffèrent par le nombre de mitochondries contenant de l'ADN anormal (b). Après de nombreuses divisions cellulaires, les cellules finissent par contenir soit de l'ADN mitochondrial totalement normal, soit de l'ADN mitochondrial totalement anormal (c). Cette tendance à l'uniformisation se produit dans les cellules au cours du développement embryonnaire. Elle s'opère également dans les ovocytes des générations féminines successives, de sorte que certains des enfants engendrés ont davantage d'ADN mitochondrial muté que leur mère et des symptômes plus graves.

produisent moins de radicaux libres et accumulent moins de lésions dans leur ADN mitochondrial que leurs congénères mieux nourris.

La jouvence par les vitamines

Si les radicaux libres favorisent effectivement l'accumulation des mutations somatiques dans l'ADN mitochondrial et accélèrent le vieillissement, des traitements qui protègent

l'ADN mitochondrial en inhibant la production des radicaux libres devraient ralentir le vieillissement et retarder l'apparition des maladies qui y sont liées. Serait-il utile d'utiliser des antioxydants (tels que le coenzyme Q ou les vitamines C ou E). Des études réalisées sur des animaux semblent encourageantes.

Pour ralentir le vieillissement, on pourrait aussi limiter l'amplification des ADN mitochondriaux mutés dans les tissus. Pour ce faire, les biologistes tentent de clarifier les interactions moléculaires qui permettent au noyau de détecter les déficits locaux en énergie et de stimuler la multiplication des mitochondries anormales environnantes.

Il y a dix ans, peu de biologistes imaginaient que des mutations dans l'ADN mitochondrial participent à de nombreuses maladies mystérieuses, ainsi qu'au vieillissement et à diverses maladies dégénératives. Aujourd'hui, l'étude de l'ADN mitochondrial

éclaire le développement de nombreuses maladies et, mieux encore, ouvre des perspectives pour leur traitement ou l'inhibition de leur évolution. Si les mutations de l'ADN mitochondrial contribuent réellement au vieillissement et au déclenchement de certaines maladies, des recherches naguère très fondamentales devraient déboucher sur des traitements qui soulageront beaucoup de souffrances humaines.

Douglas WALLACE, professeur de génétique moléculaire, dirige le Centre de médecine moléculaire d'Emory.

D.C. WALLACE, *Mitochondrial Genetics: A Paradigm for Aging and Degenerative Diseases?*, in *Science*, vol. 256, pp. 628-632, 1^{er} mai 1992.

D.C. WALLACE, *Mitochondrial DNA Variation in Human Evolution: 1994 William Allan Award Address*, in *American Journal of Human Genetics*, vol. 57, n° 2, pp. 201-223, août 1995.

D.C. WALLACE, M.D. BROWN et M.T. LOTT, *Mitochondrial Genetics*, in *Emery and Rimoin's Principles and Practice of Medical Genetics*, troisième édition, sous la direction de David L. Rimoin et al., Churchill Livingstone, 1997.

MITOMAP: a Human Mitochondrial Genome Database, 1995-1997, Center for Molecular Medicine, Emory University, Atlanta, Ga. Disponible sur le site Web de *Pour la Science* : <http://www.pourlascience.com>

Les coulées de boue

PHILIPPE COUSSOT

Les coulées de boue en montagne, des laves torrentielles dévastatrices charriant blocs de rocher, graviers et particules argileuses, ont un comportement étrange : elles se déversent par vagues et peuvent s'arrêter à mi-pente.



«Le torrent [... J s'est grossi en alluvions, entraînant des masses de rochers, de pierres, de terre, de tout, et ça dévalait dans la vallée sur Pralognan, du côté du hameau des Granges. Précédant la masse d'alluvions, il y avait un énorme rocher qui roulait et sur ce rocher il y avait une vieille femme assise qui filait avec un rouet. Les gens, avertis par le bruit du cataclysme, se sont précipités et ils ont vu cette vieille qui n'était autre que le diable.» (Ch. Favre, Darbellay.)

Ces propos, recueillis dans un village de montagne par Christian Albry et Alice Joisten (*Le monde alpin et rhodanien*, 1995, pp. 39-66), montrent combien les coulées de boue dans les torrents frappent l'imaginaire collectif. Ces écoulements, aussi appelés laves torrentielles, sont rares, imprévisibles, brutaux, bruyants et, enfin et surtout, destructeurs.

J.R. Rodine et A. M. Johnson, de l'Université de Purdue, aux États-Unis, ont décrit les effets des laves torrentielles : «Dans un grondement de tonnerre, un mur noir apparut soudain au détour du canyon. Le torrent s'emplit d'un mélange de boue et de rochers s'entrechoquant avec fracas. Cette masse visqueuse dévalait la pente en transportant d'énormes blocs posés à sa surface. Parvenu dans la vallée le torrent déborda. La lave torrentielle se répandit sur le cône de déjection [zone de dépôts des sédiments apportés par un torrent], emportant au passage maisons et voitures. Enfin, comme essoufflé, le mélange boueux et rocaillieux vint s'arrêter mollement dans des pâturages. La lave formait maintenant des lobes épais qui couvraient les champs comme une sauce au chocolat nappant un gâteau. Après quelques jours, la lave asséchée allait se pétrifier telle un béton grossier.»

Les laves torrentielles sont suffisamment fréquentes et destructrices pour que de nombreux chercheurs et ingénieurs à travers le monde étudient comment en atténuer les effets. Le premier congrès mondial relatif à la lutte contre les laves torrentielles s'est tenu en août 1996, à San Francisco. Les sujets abordés allaient de l'étude du déclenchement des coulées de lave aux mesures de protection à mettre en œuvre, en passant par les propriétés mécaniques de l'écoulement.



Philippe Coussot

1. LE 16 JUILLET 1904, un torrent de boue dans le lit du torrent de Bonrieux a envahi un village de l'Isère (voir la page de gauche). Le 24 août 1987, une lave a recouvert la zone industrielle de Modane et la voie ferrée en aval, causant environ 50 millions de francs de dégâts (ci-dessus). Depuis le début du siècle, les travaux des ingénieurs et techniciens des services de Restauration des Terrains de Montagne ont ralenti l'érosion et protégé les surfaces habitées. Les laves torrentielles restent cependant un souci, du fait du tourisme.

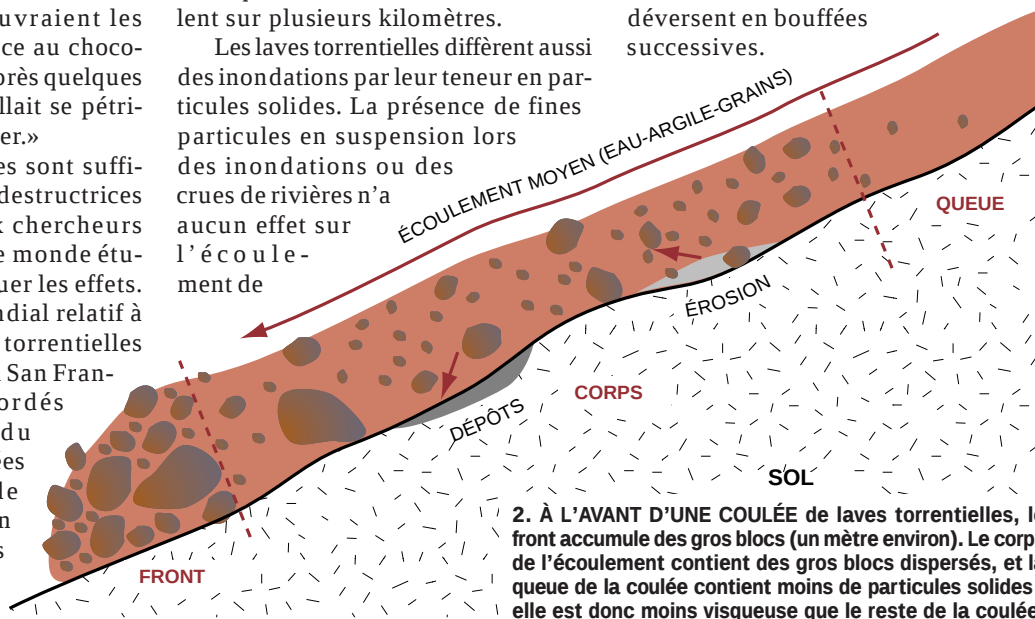
Le phénomène géophysique

Les laves torrentielles se distinguent des glissements de terrain. Elles s'écoulent continûment et inexorablement, alors que, dans les glissements de terrain, le matériau détaché se déplace comme un bloc de terrain et assez peu déformé. La distance parcourue par un glissement de terrain est courte, au plus quelques centaines de mètres, alors que les laves torrentielles s'écoulent sur plusieurs kilomètres.

Les laves torrentielles diffèrent aussi des inondations par leur teneur en particules solides. La présence de fines particules en suspension lors des inondations ou des crues de rivières n'a aucun effet sur l'écoulement de

l'eau. La coloration de l'eau est trompeuse : quelques grammes d'argile résultant de l'érosion du bassin versant donnent une coloration foncée à un litre d'eau. Dans les laves torrentielles, la masse liquide essentielle n'est pas l'eau, mais un mélange eau-argile-grains au comportement spécifique.

Enfin, contrairement aux crues torrentielles où le niveau d'eau varie lentement au cours du temps à mesure que la pluie se rassemble dans le lit du torrent, les laves torrentielles se déversent en bouffées successives.



2. À L'AVANT D'UNE COULÉE de laves torrentielles, le front accumule des gros blocs (un mètre environ). 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.

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-

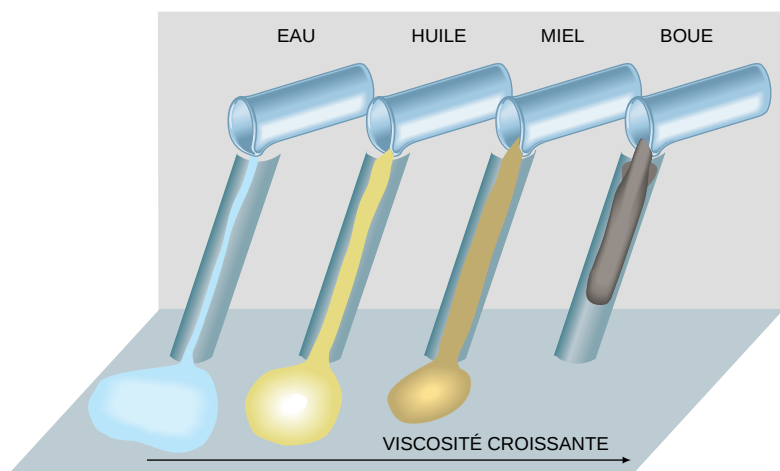
rice a coupé la ligne de chemin de fer et plusieurs routes, dont celle menant à la station des Arcs. En 1987, la zone industrielle de Modane a été envahie par une lave torrentielle (voir la figure 1). En 1995, 21 laves torrentielles « ordinaires » se sont déversées dans 9 torrents différents dans la 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.

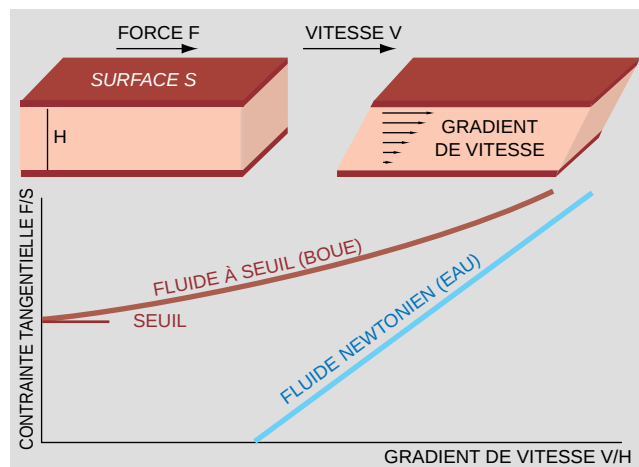
Le mode de déclenchement

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.

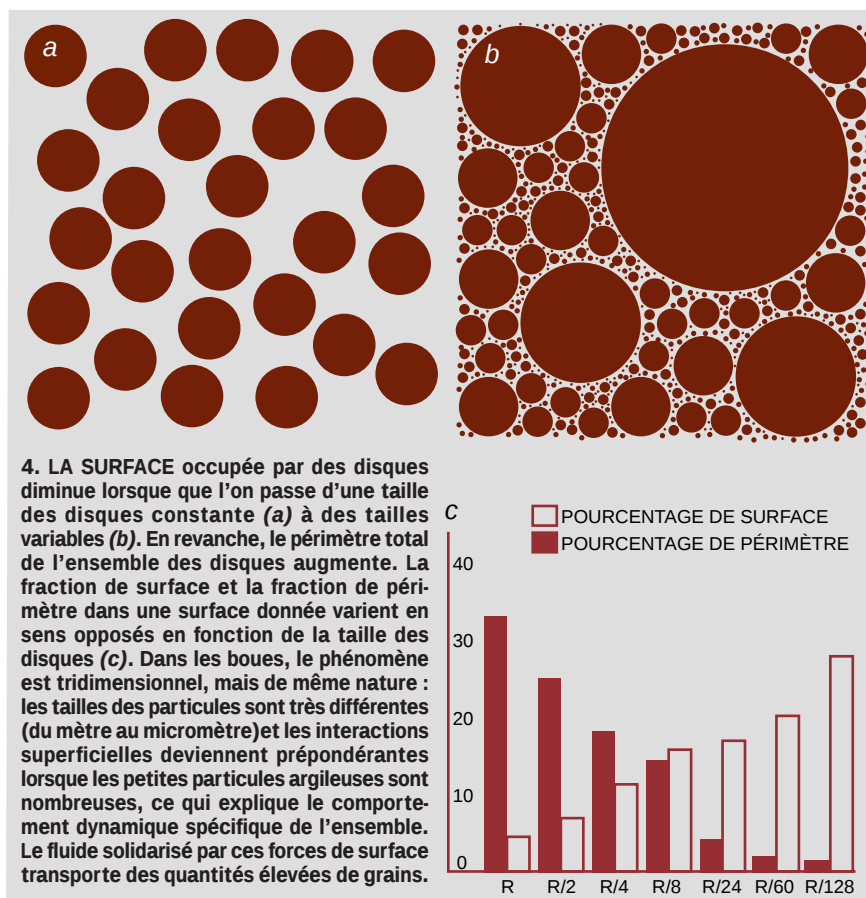
son mouvement, et par addition d'eau, formerait un fluide boueux. Cependant, lorsqu'on explore un bassin versant immédiatement après une lave torrentielle, comme l'ont fait Didier Richard et Emmanuel Bossan dans les Alpes durant l'été 1992, on ne trouve pas de zone de départ de matériau bien identifiée 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 résiduelles, 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-