

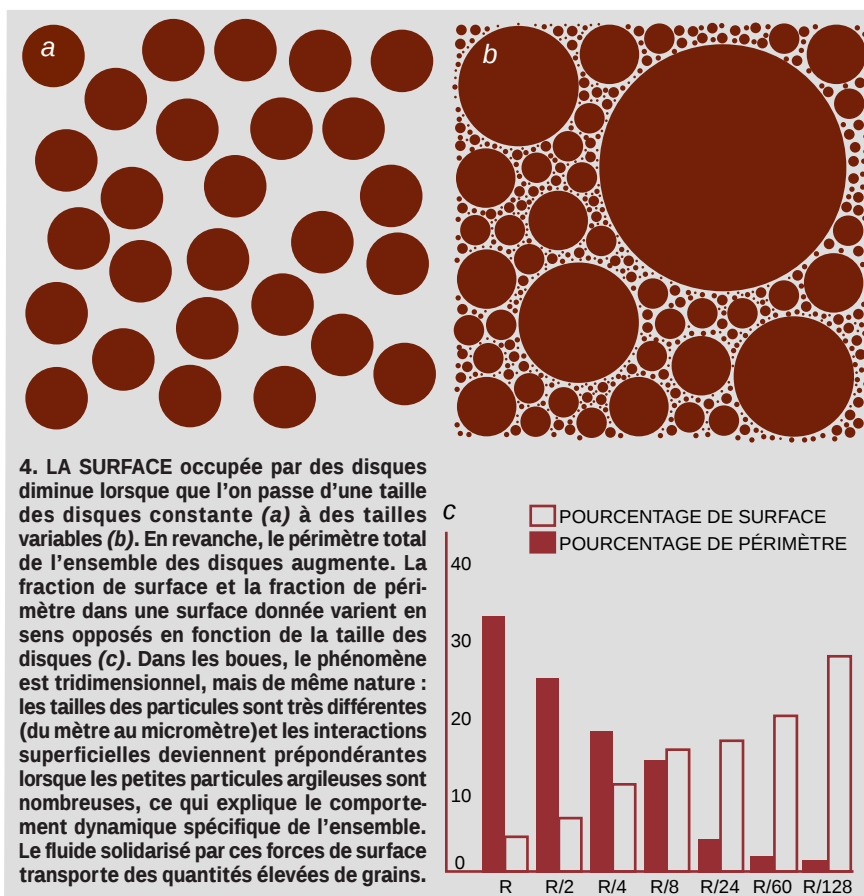
son mouvement, et par addition d'eau, formerait un fluide boueux. Cependant, lorsqu'on explore un bassin versant immédiatement après une lave torrentielle, comme l'ont fait Didier Richard et Emmanuel Bossan dans les Alpes durant l'été 1992, on ne trouve pas de zone de départ de matériau bien identifiée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

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.

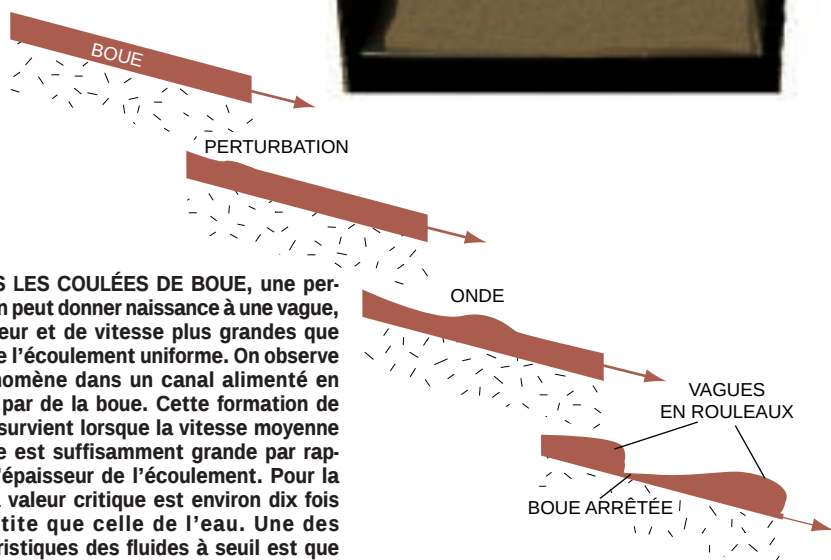
Au contraire d'un solide, qui subit des déformations limitées, un fluide s'écoule. Pour les fluides les plus simples (newtoniens), l'effort appliqué pour obtenir un mouvement est proportionnel à la vitesse de cisaillement du fluide. Lorsque deux plaques rigides sont séparées par un fluide newtonien, 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.