

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.

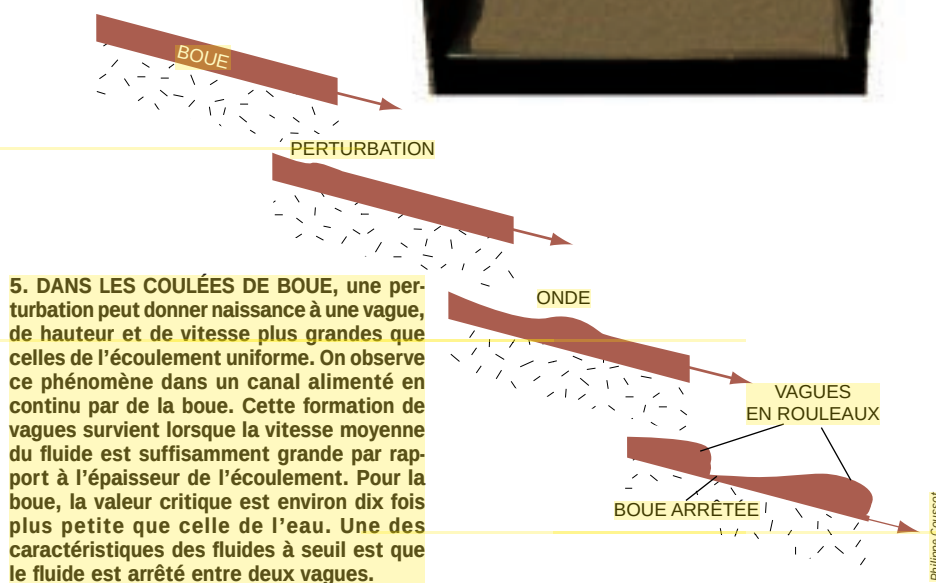
Au contraire d'un solide, qui subit des déformations limitées, un fluide s'écoule. Pour les fluides les plus simples (newtoniens), l'effort appliqué pour obtenir un mouvement est proportionnel à la vitesse de cisaillement du fluide. Lorsque deux plaques rigides sont séparées par un fluide newtonien,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



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.
