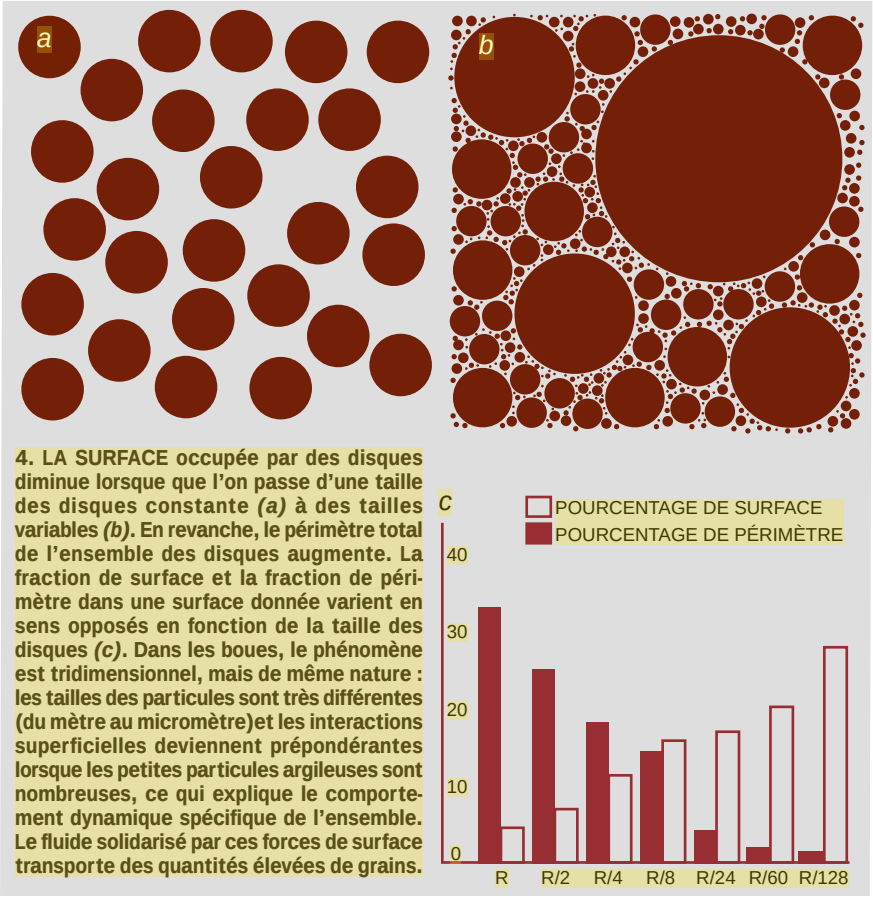
son mouvement, et par addition d'eau, formerait un fluide boueux. Cependant, lorsqu'on explore un bassin versant immédiatement après une lave torrentielle, comme l'ont fait Didier Richard et Emmanuel Bossan dans les Alpes durant l'été 1992, on ne trouve pas de zone de départ de matériau bien identifiée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



4. LA SURFACE occupée par des disques diminue lorsque que l'on passe d'une taille des disques constante *(a)* à des tailles variables *(b)*. En revanche, le périmètre total de l'ensemble des disques augmente. La fraction de surface et la fraction de périmètre dans une surface donnée varient en sens opposés en fonction de la taille des disques *(c)*. Dans les boues, le phénomène est tridimensionnel, mais de même nature : les tailles des particules sont très différentes (du mètre au micromètre)et les interactions superficielles deviennent prépondérantes lorsque les petites particules argileuses sont nombreuses, ce qui explique le comportement dynamique spécifique de l'ensemble. Le fluide solidarisé par ces forces de surface transporte des quantités élevées de grains.

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 unes 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-