

## **“Lois d'écoulement des laves torrentielles”**

### *Problème posé :*

Les laves torrentielles ne sont pas des glissements de terrain mais des mélanges boueux de densité très élevée (entre 2 et 2,5 tonnes/m<sup>3</sup>) qui se forment en général dans le haut bassin d'un torrent et parviennent en s'écoulant jusqu'au cône de déjection en transportant des gros blocs rocheux. Les dégâts qu'elles peuvent occasionner sont importants (Modane, 1987, 40 MF de dégâts) au point qu'il est apparu indispensable, pour améliorer les techniques de prévention et de protection (barrages, seuils, plages de dépôt, etc.), de progresser dans la connaissance des phénomènes physiques mis en jeu. Le travail présenté ici s'est attaché à fournir l'ensemble des outils théoriques et pratiques nécessaires pour étudier, décrire et finalement maîtriser les écoulements de laves torrentielles.

### *Hypothèses d'étude :*

En s'appuyant sur les observations directes de tels phénomènes on considère en première approximation que le matériau constitutif de ces coulées est un fluide homogène. Ceci signifie que l'on néglige un ensemble d'effets perturbateurs tels que la présence de très gros blocs par rapport aux dimensions de la coulée, l'hétérogénéité de la concentration solide et de la granulométrie d'un point à un autre du matériau, les glissements aux parois, la fracturation, la ségrégation, la sédimentation. A partir de ces hypothèses on peut étudier tout problème lié aux laves torrentielles dans un premier temps en se plaçant dans le cadre de la mécanique des fluides puis dans un second temps en déterminant si possible l'importance des effets perturbateurs énumérés ci-dessus.

### *Méthodologie :*

Les laves torrentielles étant des fluides non-newtoniens très visqueux, il s'avère indispensable de connaître leur loi de comportement. Cet aspect du problème a constitué notre première phase de travail. En injectant ces lois dans les équations du mouvement on peut alors prévoir les caractéristiques d'écoulement de laves torrentielles dans des cas relativement simples (2ème phase), puis étudier sur modèle réduit des écoulements plus complexes en similitude des phénomènes naturels (3ème phase).

### *1ère phase : Rhéologie des laves torrentielles*

Cette phase a été l'objet d'une thèse effectuée au Laboratoire de Rhéologie et soutenue en Septembre 1992, et qui avait pour but de développer de manière générale les connaissances dans le domaine de la rhéologie des mélanges boueux et rocailleux. Pour ce faire, l'ensemble des lois de comportement des suspensions et dispersions naturelles concentrées, qui sont des fluides encore particulièrement mal connues en rhéologie, ont été passées en revue. Au cours de cette phase, il a aussi été nécessaire d'améliorer les outils et techniques de rhéométrie de ces mélanges et la compréhension de leurs lois de comportement (en proposant des modèles de loi de comportement fondés sur les évolutions de la microstructure). Compte-tenu de l'état peu avancé des connaissances dans ces domaines, ce travail représente un recueil d'informations utile pour un chercheur aussi bien dans le domaine de la rhéologie des suspensions concentrées que dans le domaine des mélanges d'eau et de débris naturels ou encore et surtout dans le domaine des laves torrentielles.

**Principaux résultats obtenus pendant cette première phase :**

- Etude systématique des lois de comportement des mélanges eau-argiles ou eau-fraction fine des laves torrentielles (démonstration que ceux-ci ont une loi de comportement qui peut être correctement représentée par un modèle du type Herschel-Bulkley avec un coefficient de puissance constant proche de 1/3)
- Modélisation du comportement des dispersions concentrées dans des fluides de faible poids moléculaire, mise en valeur expérimentale et théorique d'un minimum dans la loi de comportement de certains de ces fluides, qui rend leurs écoulements instables.
- Modélisation du comportement des suspensions granulaires concentrées, mise en valeur expérimentale et théorique de propriétés analogues à celles ci-dessus pour certains mélanges très concentrés.
- Etude systématique des effets perturbateurs des expériences de rhéométrie avec des mélanges boueux et rocailleux et des précautions expérimentales à prendre pour les éviter.
- Conception et construction d'un rhéomètre de très grande taille (1 m de diamètre), unique au monde, pour tester les mélanges boueux contenant des particules grossières.
- Mise en valeur de deux types essentiels de loi de comportement pour les mélanges constitutifs des dépôts de laves torrentielles : laves boueuses -> Herschel-Bulkley avec un coefficient de puissance identique à celui de la fraction fine, et laves granulaires -> courbe d'écoulement possédant un minimum.
- Etablissement d'une classification des mélanges naturels saturés en eau en fonction de leur loi de comportement, de leur concentration solide et de leur fraction d'argile.
- Méthode pratique d'estimation des paramètres de la loi de comportement d'une lave torrentielle boueuse à partir d'expériences simples sur les matériaux constitutifs des dépôts.

D'un point de vue pratique, l'ensemble de ces résultats a fourni une classification des laves torrentielles, et a permis de mettre au point les outils théoriques et pratiques nécessaires à la détermination des paramètres de la loi de comportement des laves torrentielles boueuses. Avec ces outils il était alors possible de passer à la seconde phase.

## ***2ème phase : Lois d'écoulement des laves torrentielles***

La seconde phase de ce travail a consisté à mener en parallèle un travail théorique et expérimental dans le but d'établir les lois d'écoulement à surface libre des laves torrentielles. Compte-tenu de leur prédominance dans les Alpes françaises nous nous sommes restreints à l'étude des laves torrentielles boueuses dont la loi de comportement est du type Herschel-Bulkley (Cf 1ère phase). Les expériences ont été réalisées sur le canal adjoint à la plate-forme torrentielle du LHF en place à SOGREAH, avec des matériaux en similitude approchée des matériaux constitutifs des laves torrentielles naturelles.

D'un point de vue théorique nous avons établi les lois d'écoulement à surface libre de mélanges boueux sur un plan incliné puis en canal rectangulaire ou trapézoïdal en régime permanent uniforme ou graduellement varié. On a pu ainsi montrer que ces écoulements ont des propriétés analogues à celles des écoulements d'eau claire à surface libre (régime fluvial et torrentiel, courbes de remous, vagues déferlantes), bien que le fluide en question soit beaucoup plus visqueux (au point que le régime d'écoulement est laminaire).

Dans la littérature, les écoulements à surface libre de fluides à seuil n'ont pratiquement jamais été étudiés. Pour la première fois ici on établit des lois qui mettent en relation les caractéristiques intrinsèques du fluide (loi de comportement) et les variables de l'écoulement considéré, en régime permanent uniforme et graduellement varié. Pour la première fois aussi dans les cas les plus simples (plan infiniment large) nous avons comparé avec succès les prédictions théoriques aux résultats expérimentaux dans tous les cas cités plus haut. Ce bon accord est particulièrement intéressant et prometteur puisqu'il a été obtenu sans caler de paramètres a posteriori. Au contraire notre travail a consisté à déterminer indépendamment les paramètres rhéologiques des fluides utilisés puis à comparer les calculs théoriques (utilisant ces paramètres) aux résultats expérimentaux. On obtient finalement aussi des résultats nouveaux utilisables dans divers domaines industriels (peintures, béton frais).

Enfin il faut remarquer que les écoulements deviennent instables (développement de "roll waves") dès que la pente ou le débit sont trop forts. A partir d'une analyse de stabilité linéaire des équations du mouvement sous forme unidimensionnelle nous avons pu proposer un critère d'instabilité lié à la valeur relative du nombre de Froude et d'un autre nombre adimensionnel (égal au rapport de la contrainte à la paroi et de la contrainte critique). Ce critère s'est avéré capable de prédire assez correctement les résultats expérimentaux.

L'ensemble de ces résultats concernant les lois d'écoulement des laves torrentielles a aussi permis de déterminer la contrainte moyenne à la paroi lors d'écoulements permanents uniformes et graduellement variés, en fonction des paramètres rhéologiques, de la vitesse moyenne et de la hauteur de fluide. Cette expression peut être utilisée aussi dans des équations du type St-Venant pour prédire (sans aucun calage supplémentaire) les écoulements transitoires, comme l'ont montré les expériences

et les simulations numériques réalisées en parallèle par Dominique Laigle au CEMAGREF. Nous avons bon espoir que cette expression puisse aussi être utilisée dans les calculs (bidimensionnels) d'extension des laves sur le cône de déjection qui vont être entamés bientôt.

### *3ème phase : Méthode d'étude sur modèle réduit*

La dernière phase de notre travail a consisté à étudier les possibilités de reproduction sur modèle réduit de coulées de laves torrentielles naturelles. Le problème s'est avéré trop complexe pour être résolu de manière exacte, par une similitude complète. En effet, s'il est possible de respecter des conditions de similitude parfaites pour ce qui concerne le matériau constitutif du corps des laves boueuses, ceci n'est plus possible pour le front qui comporte une trop grande proportion de grains grossiers et possède un comportement encore mal maîtrisé. Pour contourner cette difficulté nous avons proposé de représenter en similitude approchée la formation du front à partir de matériaux boueux et granulaires en similitude des matériaux naturels correspondants. En lâchant à l'amont un certain volume de boue sur un lit tapissé de gros blocs on reproduit alors la formation progressive du front à l'avant. Compte-tenu des connaissances actuelles dans le domaine de l'érosion et du transport solide il paraît difficile de proposer une méthode plus précise.

La technique de représentation des laves torrentielles sur modèle réduit telle que nous la présentons dans la dernière partie de ce travail est prête pour des applications. Elle vient d'être utilisée (automne 1993) pour résoudre un cas concret : l'étude sur modèle réduit du franchissement du torrent de St-Bernard par l'autoroute de la Maurienne. Cette technique sera aussi prochainement appliquée à l'étude systématique des plages de dépôts menée par SOGREAH à partir des travaux réalisés au CEMAGREF. Elle sera aussi probablement utilisée pour étudier la force d'impact des laves torrentielles sur les ouvrages dans les torrents et pour dimensionner d'autres ouvrages de déviation ou de freinage des laves torrentielles.

### *Conclusion et perspectives :*

Le travail présenté ici forme donc un ensemble cohérent : nous avons d'abord précisé les lois de comportement des matériaux constitutifs des laves torrentielles, puis nous avons utilisé ces connaissances pour établir théoriquement et valider expérimentalement les lois d'écoulement des laves boueuses, enfin nous avons utilisé ces résultats pour mettre au point une technique de représentation sur modèle réduit des laves torrentielles. Même si certains de ces développements peuvent faire l'objet d'améliorations, la plupart des travaux ultérieurs (simulation numérique, conception d'ouvrages, estimation des caractéristiques essentielles des laves torrentielles sur le terrain, études de cas concrets) reposeront sur les éléments de ce travail. En outre ces travaux trouveront au CEMAGREF d'autres champs d'applications : les écoulements hyperconcentrés, les écoulements granulaires, les mouvements gravitaires rapides en général et à plus long terme les glissements de terrain. Cependant, pour qu'il soit possible d'appliquer à ces domaines des méthodologies de résolution analogues à celles que nous avons utilisées pour les laves torrentielles boueuses, il faudra

d'abord obtenir une meilleure connaissance du comportement des fluides granulaires et, par conséquent, faire porter les efforts de nos recherches sur la dynamique des écoulements granulaires.

### Références :

- \* **Coussot, P., Leonov, A.I., and Piau, J.M., (1993), "Rheology of concentrated dispersed systems in low molecular weight matrix", Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 46, pp.179-217.**
- \* **Coussot, P., et Piau, J.M., (1993), "L'écoulement des boues", La Recherche, 24, N°258, pp.1084-1091.**
- \* **Coussot, P., and Piau, J.M., (1993), "Techniques de rhéométrie en cisaillement simple dans le cas de dispersions et suspensions concentrées", soumis aux Cahiers de Rhéologie, Journal du Groupe Français de Rhéologie.**
- \* **Coussot, P., and Piau, J.-M., (1993), "On the behaviour of fine mud suspensions", to be printed in Rheologica Acta.**
- \* **Coussot, P., and Piau, J.-M., (1993), "A large-scale field coaxial cylinders rheometer to study the rheology of natural coarse suspensions", submitted to Journal of Rheology.**
- \* **Coussot, P., (1993), "Steady, laminar, flow of concentrated mud suspensions in open channel - I Theory - ", submitted to Journal of Hydraulic Research.**
- \* **Coussot, P., (1993), "Steady, laminar, flow of concentrated mud suspensions in open channel - II Experiments and comparison with theory: uniform flows - ", submitted to Journal of Hydraulic Research.**
- \* **Coussot, P., (1994), "Rhéologie des laves torrentielles", à paraître dans la Houille Blanche, numéro spécial *Hydraulique torrentielle*.**
- \* **Coussot, P., (1994), "Lois d'écoulement des laves torrentielles", à paraître dans la Houille Blanche, numéro spécial *Hydraulique torrentielle*.**
- \* **Coussot, P., et Laigle, D., (1994), "Etude des laves torrentielles sur modèle réduit en similitude des phénomènes naturels", à paraître dans la Houille Blanche, numéro spécial *Hydraulique torrentielle*.**
- \* **Laigle, D., et Coussot, P., (1994), "Modélisation numérique des écoulements de laves torrentielles", à paraître dans la Houille Blanche, numéro spécial *Hydraulique torrentielle*.**
- \* **Coussot, P., and Piau, J.M., (1994), "Rheological and flow characteristics of water-debris mixtures", submitted to Journal of Geophysical Research.**