
La modélisation des écoulements de laves torrentielles boueuses

De la validation en laboratoire au zonage des risques sur le terrain

Dominique Laigle

Les laves torrentielles (photo 1) se distinguent d'autres écoulements naturels à surface libre par les quatre caractéristiques essentielles suivantes (Meunier, 1994) :

– la nature du fluide en écoulement, qui est constitué d'un mélange d'eau, d'argile et de matériaux granulaires de tailles variables ;

– les caractéristiques de l'écoulement lui-même, qui est rapide, transitoire et présente un front raide le plus souvent constitué de blocs ;

– d'un point de vue macroscopique, le matériau constituant une lave torrentielle se comporte le plus souvent comme un fluide homogène (pas de ségrégation entre l'eau et les matériaux solides), ce qui permet de les étudier dans le cadre de la mécanique des milieux continus ;

– ce matériau s'écoulant généralement en régime laminaire, l'étude de ses propriétés rhéologiques revêt toute son importance.

Pour l'ingénieur de terrain confronté à ces phénomènes, les outils de l'hydraulique classique sont inutilisables car inaptes à représenter les caractéristiques particulières de ce type d'écoulement. Des outils spécifiques sont nécessaires et le Cemagref s'est engagé depuis un peu plus de 10 ans dans un travail de recherche dont la finalité est la compréhension et l'établissement de méthodes d'analyses applicables au terrain. Parmi les problèmes rencontrés par l'ingénieur de terrain, le zonage des risques torrentiels est d'une importance capitale, autant pour la sécurité des personnes et des biens que pour la définition

d'ouvrages de protection adaptés à chaque situation. Jusqu'à présent, seule l'expérience de l'expert permettait de répondre à ce problème. La finalité des études présentées dans cet article est de fournir des modèles utilisables comme outils d'aide à la décision, permettant à l'expert de tester de la façon la plus complète et la plus fiable possible les conséquences des crues torrentielles dans les zones où des débordements sont susceptibles de se produire. Les laves torrentielles étant des phénomènes rapides et très transitoires, seuls des modèles numériques sont en mesure de représenter les écoulements de façon suffisamment fine.

L'utilisation des équations de type Saint-Venant instationnaires, ou de formes dérivées pour modéliser les écoulements des laves torrentielles est extrêmement fréquente. Elle se justifie par la faible profondeur relative de l'écoulement (rapport de la hauteur à la longueur caractéristique de l'écoulement faible), le caractère transitoire du phénomène et la relative simplicité de leur traitement mathématique et numérique. Le point essentiel distinguant les modèles existants porte sur l'expression de la loi de frottement qui découle elle-même des hypothèses concernant la rhéologie des matériaux en écoulement. Cette caractéristique interdit l'utilisation des lois de l'hydraulique classique et rend nécessaire une approche dans le cadre de la mécanique des fluides.

Les travaux menés notamment par Coussot (1992, 1994) sur la rhéologie des laves torrentielles ont permis d'établir une distinction entre des laves torrentielles granulaires à faible teneur en argile

Dominique Laigle

Cemagref
2, rue de la
Papeterie,
Division Érosion
Torrentielle, Neige
et Avalanches,
Domaine Universitaire
BP 76
F-38402 Saint-
Martin-d'Hères

M. Meunier



▲ Photo 1. – Seuil de correction torrentielle, torrent Saint-Antoine, Savoie.

et des laves torrentielles à matrice boueuse pour lesquelles les dissipations visqueuses restent prédominantes. Cet article traitera uniquement de ce dernier type de matériau qui semble être le plus fréquemment rencontré en France. Les travaux de Coussot (1992, 1994) ont permis de dégager des lois de comportement adéquates (modèle de Herschel-Bulkley), et des lois d'écoulement théoriques ont été déduites puis validées au laboratoire en régime permanent.

Les lois d'écoulement des laves torrentielles boueuses ont été introduites dans deux modèles numériques monodimensionnel et bidimensionnel fondés sur les équations de type Saint-Venant, et dont la finalité est de représenter respectivement les écoulements canalisés dans un chenal torrentiel et les étalements sur une surface quelconque non limitée latéralement telle qu'un cône de déjection torrentiel. Du point de vue de l'ingénierie, ces deux modèles ont été construits comme des outils de calcul hydraulique pour le modèle monodimensionnel (calcul des cotes maximales atteintes dans le chenal et donc prévision des risques de débordement, calcul des vitesses de propagation du front d'écoulement,...), et d'aide au zonage des risques torrentiels pour le modèle bidimensionnel (détermination des zones maximales d'extension, des hauteurs et vitesses d'écoulement atteintes localement). Compte tenu du peu de données disponibles sur des événements réels, les deux modèles numériques ont été validés dans un premier temps au laboratoire par comparaison à des écoulements transitoires de fluide modèle.

Dans les chapitres suivants, les principales caractéristiques de ces modèles numériques sont présentées ainsi que les résultats de comparaison avec des écoulements de laboratoire. Une ébauche de méthodologie d'utilisation de ces outils dans le cadre d'un zonage des aléas torrentiels est présentée à la suite de ces caractéristiques.

Modèle Monodimensionnel

■ Présentation du modèle

Le but principal de ce modèle monodimensionnel (d'après Laigle et Coussot, 1997) est de calculer les hauteurs et vitesses locales d'un écoulement transitoire de lave torrentielle dans un chenal de géométrie constante dans le temps et ainsi de déterminer les éventuels débordements (localisation, débit en fonction du temps) ainsi que les vitesses de propagation du phénomène (mise en place de dispositifs d'alerte par exemple). Ce modèle a été développé au Cemagref sur la base des travaux de Vila (1986).

Modélisation numérique

Les équations du mouvement peuvent s'écrire sous une forme particulière, dite conservative, dont l'avantage essentiel est de vérifier la relation de Rankine-Hugoniot. Associée à un schéma numérique approprié, cette formulation permet de construire un modèle numérique capable de traiter un front d'écoulement comme n'importe quel point courant. Le raisonnement concerne un écoulement canalisé, traduit par un système d'équations monodimensionnelles qui s'écrit alors sous la forme conservative suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} S \\ Q \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \begin{pmatrix} Q \\ \alpha \frac{Q^2}{S} + P(S, x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ gS \sin(\theta) - \text{Frot} + B(S, x) \end{pmatrix}$$

S : section transversale droite de l'écoulement

Q : débit du mélange dans cette section

α : coefficient correctif sur le profil des vitesses

Frot : contribution du frottement à la paroi (fond et parois latérales du chenal)

P(S,x) : contribution de la pression sur la section

B(S,x) : contribution de la pression latérale due aux rétrécissements et élargissements du chenal

x : abscisse curviligne définie le long du chenal

θ : angle entre le fond du chenal et l'horizontale

Si l'on considère uniquement le premier membre des équations de type Saint-Venant conservatives, on obtient un système strictement hyperbolique non linéaire pour lequel il existe des méthodes bien adaptées de résolution numérique telles que le schéma de Godunov (Vila, 1986) qui est, dans le cas présent, utilisé dans le cadre d'une approximation aux différences finies. Une solution de ce problème étant obtenue, une correction est ensuite réalisée pour tenir compte du second membre (gravité, loi de frottement)

Loi de frottement

Pour un problème où sont connues les conditions initiales, les conditions aux limites et la géométrie du chenal d'écoulement, la loi de frottement reste la seule inconnue des équations de Saint-Venant. Elle seule permet d'introduire le comportement particulier du fluide dans les équations de bilan physique (conservation de la masse et de la quantité de mouvement). On s'intéresse uniquement au cas des laves torrentielles boueuses qui ont un comportement bien représenté par une loi de type Herschel-Bulkley (Coussot, 1992). En cisaillement simple, ce modèle est donné par l'expression suivante :

$$\text{si } \tau > \tau_c \quad \tau = \tau_c + K \dot{\gamma}^n$$

$$\text{si } \tau < \tau_c \quad \dot{\gamma} = 0$$

τ_c est la contrainte seuil (Pa), K est un coefficient d'écoulement (Pa.sⁿ) et $\dot{\gamma}$ (s⁻¹) le taux de cisaillement. D'après les analyses menées par Coussot (1994), il est apparu que dans une large gamme de gradients de vitesses, un bon ajustement d'une loi de Herschel-Bulkley aux mesures expérimentales est généralement obtenu pour une valeur du coefficient n égale ou proche de 1/3.

Des considérations théoriques sur l'écoulement d'un tel fluide sur un plan infiniment large, corroborées et complétées par des expériences en canaux de section quelconque ont permis d'établir les expressions suivantes de la contrainte de cisaillement moyenne à la paroi pour un écoulement permanent uniforme dans un canal ouvert :

$$\tau_p = \tau_c \left(1 + a \left(\frac{\tau_c}{K} \left(\frac{h}{U} \right)^{\frac{1}{3}} - 0,9 \right) \right)$$

où h est la hauteur d'écoulement, U est la vitesse moyenne d'écoulement dans une section transversale et a est un paramètre de forme de la section en travers ; 1,93 est sa valeur théorique établie pour un canal très large (Coussot 1994).

Le frottement en régime permanent tenant compte de la vitesse moyenne et de la hauteur de fluide locales, il est supposé que la résistance locale à l'écoulement transitoire est égale au frottement calculé pour un même débit et une même hauteur d'écoulement locaux par la formule établie en régime permanent uniforme.

L'expression du terme de frottement introduit dans les équations du mouvement est alors donnée par :

$$\text{Frot} = \frac{\tau_p}{\rho} \text{Pe}$$

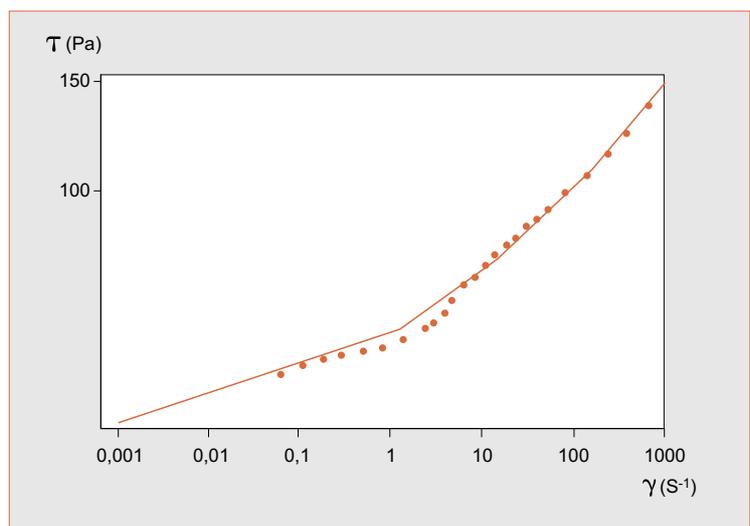
Pe : Périmètre mouillé

ρ : masse volumique du mélange

■ **Validation au laboratoire**

Pour valider le modèle, on compare ses résultats de simulation à des écoulements de mélanges eau-argile naturelle réalisés en canal de laboratoire et en similitude à des écoulements naturels de laves torrentielles. Les paramètres de la loi de frottement sont déduits directement de mesures rhéométriques effectuées sur chacun des échantillons des matériaux utilisés (la figure 1 présente un tel exemple d'ajustement pour un mélange eau-kaolin), ainsi la confrontation n'introduit pas de calage de paramètres.

Figure 1. – Exemple d'ajustement d'une loi de Herschel-Bulkley sur des points expérimentaux de mesures rhéométriques (rhéomètre plan-plan) portant sur un mélange eau-kaolin à 25 % de concentration volumique solide. Dans le cas présent le meilleur ajustement est obtenu avec $\tau_c = 38$ Pa, $n = 0,25$ et $K = 19$. En pratique, dès lors que l'on s'intéresse aux écoulements de ce type de matériau, un nouvel ajustement est calculé en prenant $n = 1/3$.



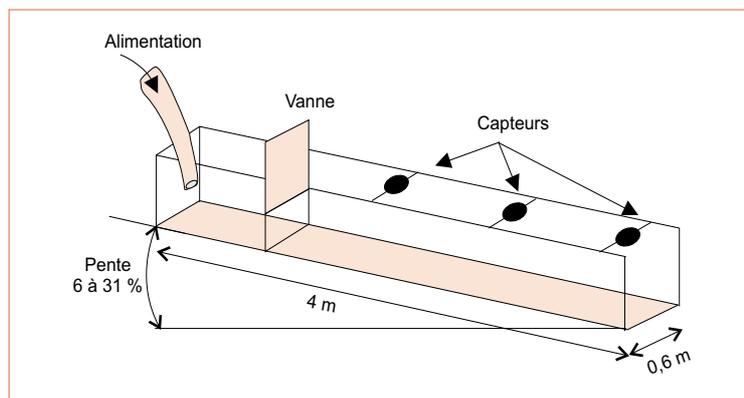
Le principe expérimental retenu consiste à effectuer, en conditions maîtrisées, des lâchers instantanés d'une quantité donnée de fluide modèle dans un canal ainsi qu'à mesurer les hauteurs d'écoulement en différents points en fonction du temps et cela pour différentes pentes, différentes quantités de matériau, et différentes valeurs des paramètres rhéologiques des matériaux.

Quatre matériaux ont été utilisés en pratique (tableau 1). Le dispositif expérimental (figure 2) est constitué d'un canal à section rectangulaire de 4 m de long et 0,6 m de large. La pente de ce canal est variable (des pentes de 6 % à 31 % ont été utilisées en pratique). L'extrémité amont du canal (abscisse $x = 0$) est limitée par une cloison. À l'abscisse 0,85 m est disposée une vanne guillotine qui peut être ouverte très rapidement par coulissement vers le haut. Aux abscisses 1,65 m, 2,75 m et 3,85 m sont disposés trois capteurs de distance à ultrasons, reliés à une centrale d'acquisition qui enregistre 33 mesures de hauteur d'écoulement par seconde et par capteur. Chaque condition expérimentale est entièrement décrite par

Tableau 1. – Caractéristiques du matériau. ▼

Matériau	Caractéristiques du matériau		
	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Contrainte seuil τ_c (Pa)	Coefficient K (Pa.s ^{1/3})
A	1 410	19,0	3,5
B	1 422	19,7	5,6
C	1 397	9,5	3,1
D	1 330	4,5	1,4

Figure 2. – Dispositif expérimental. ▼



deux nombres adimensionnels notés G' et H' :

$$G' = \frac{\rho g H_{\text{bar}} \sin \theta}{\tau_c} \quad H' = \frac{K}{\tau_c} \left(\frac{g \cos \theta}{H_{\text{bar}}} \right)^{\frac{1}{6}}$$

H_{bar} : hauteur de matériau stocké au niveau du barrage au temps initial.

Qualitativement, les simulations et les mesures présentent une bonne concordance. La forme des hydrogrammes est généralement bien respectée (figure 3), les ordres de grandeur des hauteurs et des temps de propagation sont tout à fait cohérents avec les mesures.

Les différences portent sur :

- un décalage des hauteurs maximales d'écoulement, dans un rapport généralement inférieur à 20 % de la valeur mesurée (figure 4) ; toutefois, 12 % des valeurs calculées s'écartent de cet intervalle, un certain nombre d'entre elles correspondent à des phases d'arrêt ; lors de ces phases, le modèle est très sensible à une incertitude, même faible, sur les valeurs des paramètres ;

- un décalage du temps d'arrivée au niveau d'un capteur, généralement compris dans la fourchette -20 % à +10 % de la valeur mesurée sauf pour les écoulements proches d'une phase d'arrêt pour lesquels le décalage peut être important (sensibilité forte) ;

- un décalage sur la hauteur d'écoulement observée en fin d'expérience (à $t = 10$ secondes), pouvant varier entre 0 et +10 % à +15 % de la hauteur mesurée ;

- un décalage de l'ordre de 25 % de la distance parcourue, mesurée dans le cas de calculs de la distance d'arrêt.

La plupart des différences observées restent à l'intérieur de la fourchette de précision que l'on peut raisonnablement attendre des mesures. Les incertitudes sur l'estimation des paramètres rhéologiques ou les incertitudes expérimentales en général sont assez fortes pour expliquer les différences entre calculs et mesures, pouvant ainsi masquer les éventuelles imprécisions du modèle lui-même.

Modèle bidimensionnel

Le but principal du modèle bidimensionnel (d'après Laigle, 1997) est de décrire l'étalement et l'arrêt des laves torrentielles sur un cône de déjection. Sont exposées dans cet article les principales caractéristiques du modèle ainsi que la comparaison à des mesures d'écoulements transitoires de fluide modèle au laboratoire. Ce modèle a été développé au Cemagref sur la base des travaux de Vila (1986).

■ Présentation du modèle

De façon analogue au modèle monodimensionnel, le modèle bidimensionnel est fondé sur les équations de Saint-Venant figurant dans ce chapitre sous leur forme bidimensionnelle associées à une loi de frottement déduite elle aussi des travaux de Coussot (1992, 1994), et qui se présente sous une forme analogue à celle exposée pour le modèle monodimensionnel. Ainsi, ce modèle ne s'applique qu'aux écoulements de laves torrentielles boueuses décrites par une loi de comportement de type Herschel-Bulkley.

Les hypothèses qui ont été retenues sont les suivantes :

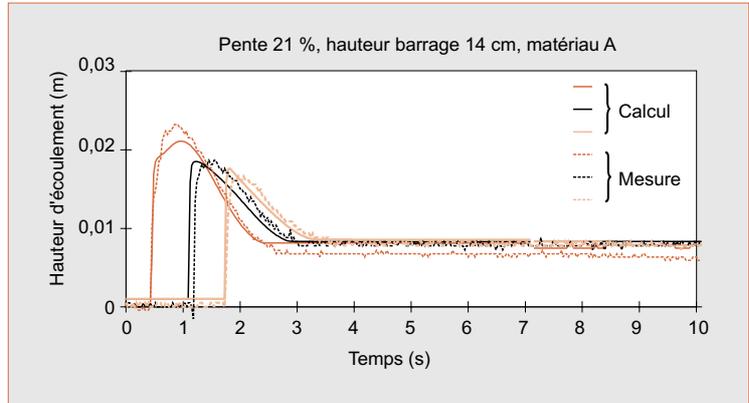
- comme dans le cas 1D, l'expression de la contrainte à la paroi est considérée comme équivalente localement à celle obtenue en régime permanent uniforme pour une même hauteur d'écoulement et une même vitesse moyenne ;
- les termes de contraintes de cisaillement introduits par les différences de vitesse dans un plan horizontal sont dans un premier temps négligés ;
- on suppose également que les contraintes normales s'exerçant sur un élément de fluide se réduisent au terme de pression dont la répartition est supposée de forme hydrostatique.

Dans ces conditions, le système d'équations à résoudre est donné par les expressions suivantes :

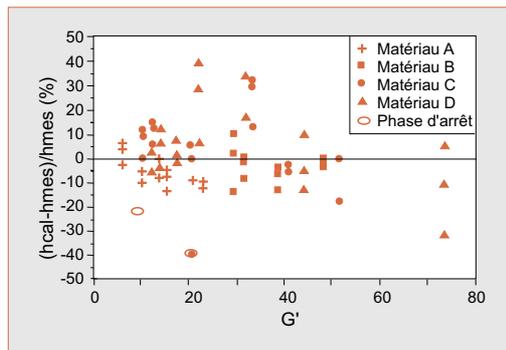
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial(h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial\left(h\delta\bar{u}^2 + \frac{g\beta h^2}{2}\right)}{\partial x} + \frac{\partial(h\delta\bar{u}\bar{v})}{\partial y} = g\sin(\theta_x)h - \frac{\bar{u}}{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}} \frac{\tau_p}{\rho}$$

$$\frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(h\delta\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial\left(h\delta\bar{v}^2 + \frac{g\beta h^2}{2}\right)}{\partial y} = g\sin(\theta_y)h - \frac{\bar{v}}{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}} \frac{\tau_p}{\rho}$$



▲ Figure 3. – Exemple de comparaison directe simulations/mesures.



◀ Figure 4. – Comparaison entre simulations et mesures des hauteurs d'écoulement (hcal : hauteur calculée, hmes : hauteur mesurée, G' : paramètre adimensionnel défini précédemment).

$$\tau_p = \tau_c \left(1 + 1,93 \left(\frac{\tau_c}{K} \left(\frac{h}{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}} \right)^{\frac{1}{3}} \right)^{-0,9} \right)$$

$$\beta = \cos(\theta_x) \cos(\theta_y)$$

h : hauteur d'écoulement locale

u : composante selon l'axe Ox de la vitesse

v : composante selon Oy de la vitesse

θ_x : angle de la pente selon l'axe Ox

θ_y : angle de la pente selon Oy

δ : coefficient correctif dépendant du profil des vitesses

le symbole $\bar{}$ sur u et v représente la valeur moyenne des vitesses sur la hauteur h d'écoulement

le coefficient géométrique a est pris égal à 1,93, les conditions d'écoulement en canal très large étant constamment respectées.

Ces équations sont résolues par un schéma de Godunov (Vila, 1986) proche de celui utilisé par le modèle monodimensionnel et qui est utilisé ici dans le cadre d'une approximation aux volumes finis.

Validation en laboratoire

Pour les mêmes raisons que celles exposées pour le modèle monodimensionnel, le modèle bidimensionnel est validé par comparaison à des écoulements de fluide modèle au laboratoire.

Le dispositif expérimental utilisé (figure 5) est constitué d'une plate-forme de 2,10 m de large et 6,0 m de long. Cette plate-forme est divisée en trois parties : un réservoir à surface libre dans lequel le matériau est initialement stocké, un canal

de 0,75 m de long et 0,5 m de large obturé par une vanne guillotine et une zone d'étalement d'une longueur de 4 m où sont observés les étalements. Dix capteurs de distance à ultrasons permettent de mesurer les hauteurs d'écoulements en fonction du temps. Le matériau modèle utilisé est un mélange d'eau et de kaolin dont les paramètres rhéologiques ont été mesurés de façon indépendante (tableau 2). Les expériences ont été menées à différentes pentes (10, 14, 15 et 20 %) pour différentes quantités de matériau stocké et différentes caractéristiques rhéologiques. Le matériau initialement stocké dans le réservoir est rapidement libéré à l'ouverture de la vanne qui déclenche également le système d'acquisition des hauteurs d'écoulement. En fin d'expérience, lorsque l'arrêt est atteint, un relevé des zones maximum d'extension est effectué par photographie du dépôt.

La comparaison entre mesures et calculs a porté, d'une part sur les caractéristiques dynamiques des écoulements (hauteur maximale d'écoulement, temps de propagation pour atteindre un capteur), et d'autre part sur les caractéristiques de la zone d'arrêt (limites de la zone maximale d'extension). La finalité du modèle étant le zonage des risques, une bonne représentation des zones atteintes constitue un critère essentiel à la validation du modèle. Selon que l'on s'intéresse à l'une ou l'autre de ces deux caractéristiques, les résultats de la comparaison sont relativement différents. En effet, concernant les caractéristiques dynamiques, les différences entre calculs et mesures peuvent être parfois élevées (la différence peut atteindre 100 %

Figure 5. – Dispositif expérimental. ▼

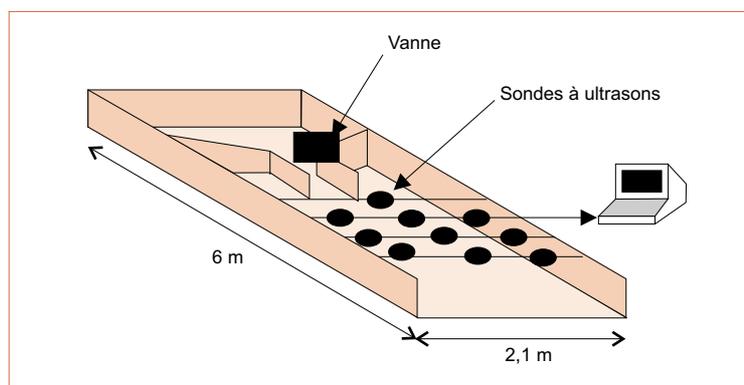


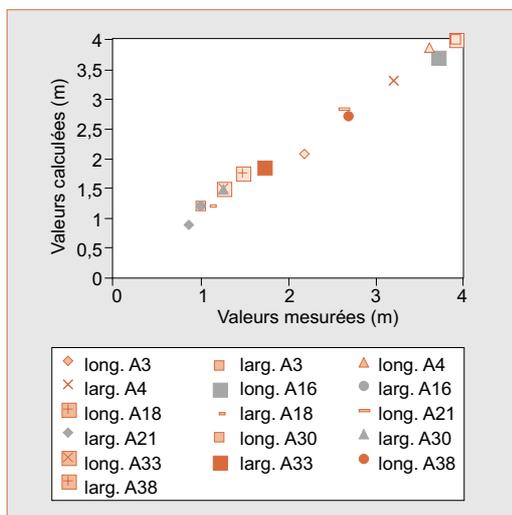
Tableau 2. – Caractéristiques des essais réalisés. ▼

N° du test	Caractéristiques du matériau			Caractéristiques géométriques		
	Masse volumique ρ (kg/m ³)	Contrainte seuil τ_c (Pa)	Coefficient K (Pa.s ^{1/3})	Pente de la plate-forme (m/m)	Largeur du canal (m/m)	Hauteur au barrage (m)
A3	1 374	29,7	15,77	0,14	0,5	0,160
A4	1 374	29,7	15,77	0,14	0,5	0,210
A16	1 394	33,0	20,78	0,20	0,5	0,220
A18	1 396	29,7	15,40	0,20	0,5	0,200
A21	1 396	29,7	15,40	0,20	0,5	0,170
A30	1 396	29,7	15,40	0,15	0,5	0,225
A33	1 388	29,7	16,50	0,10	0,5	0,210
A38	1 388	29,7	16,50	0,10	0,5	0,190

de la valeur mesurée). Deux phases d'écoulement peuvent être distinguées. Lorsque l'écoulement est rapide et donc parfaitement développé, les différences restent faibles et de l'ordre de grandeur de celles observées dans le cas monodimensionnel. En revanche, pour les phases d'écoulement proches de l'arrêt, les différences sont maximales. Ceci peut s'interpréter par la forte sensibilité du modèle dans cette phase particulière de l'écoulement. Ce comportement avait été observé précédemment sur le modèle monodimensionnel.

On doit donc conclure que dans la phase d'arrêt, le modèle traduit assez mal les caractéristiques dynamiques de l'écoulement aux points de mesure. Le front d'écoulement est raide et par conséquent, un faible décalage sur la position du point de mesure entraîne des variations fortes sur les valeurs mesurées. Si l'on considère en revanche la représentation par le modèle de la zone maximum d'extension, les différences entre calculs et mesures sont faibles (figure 6). Non seulement, la forme générale du dépôt est bien respectée, mais les dimensions caractéristiques (longueur et largeur) du dépôt sont également bien traduites. Les différences sont généralement inférieures à 20 % des valeurs mesurées, ce qui est à rapprocher de la précision des mesures rhéométriques effectuées sur le matériau.

Figure 6. – Comparaison entre les valeurs calculées puis mesurées des longueurs et largeurs de dépôt à l'arrêt. ▼



■ Conclusion sur la validation en laboratoire

Les modèles exposés présentent une bonne capacité à représenter les écoulements canalisés d'une part et les zones d'étalement d'autre part. On peut donc considérer qu'ils sont correctement validés en laboratoire. On notera tout particulièrement qu'aucun calage de paramètres n'a été introduit dans cette approche, ce qui non seulement garantit la qualité de l'outil mais a permis d'en établir les limites de validité.

Application sur le terrain : nature du problème et réponses possibles

Le modèle bidimensionnel qui a été présenté dans le chapitre précédent a pour finalité de devenir un outil de zonage du risque torrentiel. Cependant une telle utilisation ne pourra être à la fois correcte et efficace que si elle s'intègre dans une méthodologie d'analyse du terrain permettant notamment de préciser les valeurs des paramètres à introduire dans les modèles. Ce chapitre ne doit donc pas être strictement considéré dans un cadre de recherche scientifique mais plutôt dans le contexte d'une réflexion sur l'ingénierie de la protection contre les crues torrentielles.

Les modèles ayant été validés en laboratoire, l'étape suivante de leur développement consistera à les valider sur le terrain. Des travaux ont été engagés dans ce but mais la relative rareté des phénomènes naturels n'a pas encore permis d'effectuer une comparaison entre des observations de terrain et les calculs, dans des conditions satisfaisantes. Toutefois, pour améliorer les possibilités des modèles, il est souhaitable de les appliquer de façon prospective à des cas concrets afin de mieux cerner les difficultés pratiques d'utilisation, mais également de mieux apprécier leur pertinence dans des cas simples et de proposer des améliorations pour un usage simplifié.

Dans un premier temps et à partir d'un exemple, il faut définir les problèmes qui peuvent se poser en pratique lorsqu'on veut réaliser un zonage de l'aléa « laves torrentielles » sur un cône de déjection indépendamment de toute interaction avec les enjeux. Une telle réflexion est actuellement menée de façon prospective sur le torrent du Pousset, torrent célèbre pour ses événements de grande ampleur et les dégâts causés par le passé, et qui est situé non loin de Saint-Michel-de-Mau-

rienne en Savoie. Analysons donc par ordre les processus et essayons de savoir ensuite quelles réponses peuvent être apportées et comment les modèles présentés aux chapitres précédents peuvent aider à une compréhension satisfaisante.

■ *Génération des crues*

Les processus de génération des laves torrentielles sont encore assez mal connus et à ce titre, il n'est pas possible à l'heure actuelle de définir une crue en termes de volume, durée, débit maximal, forme de l'hydrogramme et de lui associer une période de retour qui situe le risque encouru. Ceci est partiellement possible par une analyse historique des événements passés, à condition que les documents d'archives soient suffisamment nombreux. Pour les laves torrentielles, le problème est rendu complexe par la nature même du matériau dont la teneur en eau et donc les paramètres rhéologiques, peuvent varier d'un événement à l'autre, voire au cours d'un même événement.

Dans ces conditions, seule une analyse fondée sur des scénarios est pertinente. Une telle analyse suppose toutefois de définir un intervalle de valeurs plausibles pour chacun des facteurs présentés ci-dessus (volume, débit, etc.) y compris les paramètres rhéologiques, et de croiser ces valeurs en leur affectant une certaine probabilité qui, bien sûr ne peut généralement être que qualitative. L'intérêt du modèle numérique est constitué par la facilité avec laquelle on peut changer les paramètres, ce qui autorise un nombre important de calculs fondés sur différents scénarios. Les méthodes permettant de fixer des intervalles de valeurs de volumes, débits, etc. ne seront pas décrites car elles relèvent le plus souvent du domaine de l'expertise. Toutefois, on notera que pour les paramètres rhéologiques, des méthodes d'analyse existent. Elles portent sur l'analyse rhéométrique de la fraction fine du matériau, l'analyse rhéométrique à grande échelle (rhéomètre de grande taille ; Coussot, 1992) et l'observation de dépôts anciens (Coussot *et al.*, 1998). La teneur en eau du matériau susceptible de s'écouler lors d'un futur événement reste toutefois inconnue, d'où la nécessité de raisonner là aussi sur un intervalle de valeurs.

■ *Processus d'écoulement canalisé et débordement*

Les scénarios ayant permis de définir les conditions d'entrée dans le chenal d'écoulement, on cherche ensuite à connaître les conditions d'en-

trée sur le cône de déjection et comment est initialisé l'étalement. Si les points de débordement sont localisés, ce qui n'est pas le cas général, l'initialisation de l'étalement est assez simple à définir. Dans le cas contraire (débordement non localisé), un calcul hydraulique mené grâce au modèle monodimensionnel peut permettre, sur la base des scénarios précédemment établis, de définir les hauteurs d'écoulement en tout point du chenal et pour chaque instant. Par conséquent, il est possible théoriquement d'établir par cette méthode des cotes et débits de débordement sur le cône de déjection, ainsi qu'une localisation de ces débordements (répartis ou localisés). En pratique, ce problème reste toutefois délicat pour deux raisons qui sont, d'une part une connaissance encore très partielle du processus de débordement et d'initiation de l'étalement qui n'a pratiquement pas fait l'objet d'études spécifiques, et d'autre part, on ne sait pratiquement pas tenir compte à l'heure actuelle de l'influence du front granulaire sur l'écoulement du corps d'une lave boueuse. On peut toutefois supposer que le front granulaire tend à augmenter localement la hauteur d'écoulement et donc à modifier les conditions du débordement. Ce point particulier nécessiterait un travail scientifique important qui n'a encore été que partiellement mené.

■ *Processus d'étalement*

La description de ce processus semble actuellement la mieux maîtrisée. En effet nous disposons d'un modèle bidimensionnel d'étalement du corps des laves boueuses validé en laboratoire. Or, il est très probable que dès lors que le débordement et l'étalement se produisent, le matériau concerné est essentiellement du corps de lave avec disparition du front. En d'autres termes, le volume du front devient négligeable devant la surface d'étalement et son influence diminue.

Conclusion

Nous disposons de deux modèles numériques respectivement monodimensionnel et bidimensionnel validés en laboratoire. L'utilisation couplée de ces deux modèles autorise théoriquement un calcul du débordement hors du chenal, de l'initiation et du développement d'un étalement de lave torrentielle boueuse sur un cône de déjection torrentiel. Quelques points limitent encore la généralité de cette approche : notamment une connaissance

encore trop partielle des processus de débordement et surtout la prise en compte de l'effet du front granulaire sur un écoulement canalisé. Ces deux points font l'objet actuellement de recherches au sein de l'unité de recherche Érosion Torrentielle, Neige et Avalanches du Cemagref. Compte tenu

de la méconnaissance qui persiste encore sur les phénomènes d'initiation des laves torrentielles, une approche fondée sur des scénarios de crue est nécessaire au raisonnement de l'ingénieur de terrain. Les modèles numériques sont des outils souples qui s'intègrent très bien dans ce type de démarche. □

Résumé

Les laves torrentielles boueuses sont des écoulements transitoires rapides qui mobilisent des mélanges d'eau et de matériaux solides de granulométrie très étendue dès lors que certaines conditions d'humectation des sols en place sont atteintes. D'un point de vue rhéologique, lorsque que la teneur en argile est suffisante, les matériaux concernés se comportent au niveau macroscopique comme des fluides à seuil rhéofluidifiants. Le caractère transitoire de ces phénomènes a nécessité la mise au point d'outils numériques spécifiques pour les étudier et pour prédire leur comportement. Ainsi deux modèles fondés sur des équations de type Saint-Venant associées à une loi d'écoulement spécifique ont été écrits pour représenter les écoulements canalisés d'une part, et les étalements hors d'un chenal principal d'autre part. Ces deux modèles ont été validés par comparaison à des écoulements de fluides modèles (sur modèle réduit) en laboratoire. L'accent est actuellement mis sur l'utilisation pratique de ces modèles sur le terrain, dans le cadre de zonages des risques torrentiels. Compte tenu de l'indétermination pesant dans la plupart des cas sur l'ampleur de ces phénomènes, une approche fondée sur des scénarios de crue est nécessaire. Une telle démarche nécessite l'utilisation couplée des deux modèles précédemment cités mais également l'emploi de diverses méthodes de laboratoire ou de terrain dont le but est d'obtenir une meilleure caractérisation des matériaux susceptibles de s'écouler. Ce travail permet également de mettre en évidence des axes de recherche à développer pour améliorer les performances des outils proposés.

Abstract

Mudflows are fast, transitory flows formed of a mixture of water and solids with widely varying particle sizes which occur in certain wet conditions affecting the natural soil. When there is a sufficiently high clay content, the material is, from a macroscopic point of view, thixotropic. The transitory nature of these events required the development of specific numerical models in order to study and predict their behaviour. Two models based on shallow-water equations in conjunction with a special flow model were implemented to represent channelled flows and the spreading of material outside the main channel. These two models were validated in the laboratory by comparison with flows of model fluids (on a reduced scale). The paper then considers the practical application of these model in the field for zoning flood risks. Given the uncertainty of the extent of such events, a study based on flood scenarios was necessary. This approach called for the use of these two models in conjunction with various laboratory or field techniques which were intended to provide better characterisation of the material liable to flow. This project also reveals directions for research to improve the performance of the tools proposed.

Bibliographie

- COUSSOT, P., 1992. *Rhéologie des boues et laves torrentielles, Étude de dispersions et suspensions concentrées*, coll. Études, Montagne n° 5, Cemagref.
- COUSSOT, P., 1994. Steady, laminar, flow of concentrated mud suspensions in open channel, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 32, n° 4.
- COUSSOT, P., LAIGLE, D., ARATTANO, M., DEGANUTTI, A., MARCHI, L., 1998. Direct Determination of Rheological Characteristics of a Debris Flow, à paraître dans *Journal of Hydraulic Engineering*.
- LAIGLE, D., COUSSOT, P., 1997. Numerical Modeling of Mudflows, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 123, n° 7.
- LAIGLE, D., 1997. *A Two-Dimensional Model for the study of Debris-Flow Spreading on a Torrent Debris Fan*, Proceedings of the Debris-Flow Hazards Mitigation : Mechanics, Prediction, and Assessment ASCE conference, San Francisco, August 7-9, 1997, Cheng-Lung Chen Editor.
- MEUNIER, M., 1994. *Éléments d'Hydraulique Torrentielle*, coll. Études, série Montagne n° 1, Cemagref.
- VILA, J.-P., 1986. *Sur la théorie et l'approximation numérique de problèmes hyperboliques non linéaires. Applications aux équations de Saint-Venant et à la modélisation des avalanches de neige dense*, Thèse de doctorat, Université Paris VI, 481 p.