



**HAL**  
open science

## Écoulement gravitaire de fluides complexes : modélisation expérimentale des laves torrentielles

Guillaume Chambon, A. Ghemmour, D. Laigle, A. Magnin

► **To cite this version:**

Guillaume Chambon, A. Ghemmour, D. Laigle, A. Magnin. Écoulement gravitaire de fluides complexes : modélisation expérimentale des laves torrentielles. CFM 2007 - 18ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2007, Grenoble, France. hal-03361636

**HAL Id: hal-03361636**

**<https://hal.science/hal-03361636v1>**

Submitted on 1 Oct 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Écoulement gravitaire de fluides complexes : modélisation expérimentale des laves torrentielles

G. Chambon<sup>1</sup>, A. Ghemmour<sup>1</sup>, D. Laigle<sup>1</sup> & A. Magnin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Unité Érosion Torrentielle, Neige et Avalanches – Cemagref  
Domaine Universitaire – BP 76  
38402 St-Martin-d'Hères Cédex – France

<sup>2</sup> Laboratoire de Rhéologie – UMR 5520  
Domaine Universitaire – BP 53  
38041 Grenoble Cedex 9 – France

guillaume.chambon@cemagref.fr

## Résumé :

*Nous décrivons un nouveau dispositif expérimental dédié à l'étude des laves torrentielles. Il s'agit d'un canal incliné dont le fond est constitué par un tapis roulant circulant vers l'amont à vitesse contrôlée. À terme, le matériau naturel sera simulé par des mélanges de grains solides dans un gel viscoplastique transparent (Carbopol). Nous présentons ici une série d'expériences préliminaires conduites en utilisant le gel viscoplastique seul. Différents angles de pente et différentes vitesses du tapis ont été testées. Dans tous les cas, nous observons la formation d'une coulée stationnaire avec un front immobile dans le référentiel du laboratoire. Le front lui-même est très raide. Derrière, l'épaisseur de la coulée se stabilise à une valeur constante qui croît avec la vitesse du tapis. Quantitativement, nous montrons que cette épaisseur uniforme est identique à celle que présenterait un écoulement permanent et uniforme de vitesse moyenne égale à la vitesse du tapis. Ceci constitue une validation de notre dispositif et indique que celui-ci peut être considéré comme un rhéomètre de grande dimension.*

## Abstract :

*We describe a new experimental setup dedicated to the study of debris flows. The setup consists in an inclined channel whose bottom is constituted by an upward-moving conveyor belt with controlled velocity. Natural debris flow material will be simulated using mixtures of solid grains in a transparent viscoplastic gel (Carbopol). Here, we present a series of preliminary experiments conducted with the viscoplastic gel alone. Different slope angles and different belt velocities have been tested. In all cases, we observe the creation of a stationary surge with immobile front in the laboratory frame. The front itself is very steep. Behind it, surge thickness levels off at a constant value which increases with belt velocity. Quantitatively, we show that this uniform thickness is identical to the thickness that would be exhibited by a steady uniform flow with average velocity equal to the belt velocity. This constitutes a validation of our setup and indicates that it can be regarded as a large-scale rheometer.*

## Mots-clefs :

**écoulement gravitaire ; propagation ; fluide viscoplastique**

## 1 Introduction

De nombreux écoulements naturels impliquent des fluides complexes dont le comportement est fortement non-newtonien (neige, boue, grains). Dans cette communication, nous nous intéressons plus spécifiquement à un type particulier d'écoulement gravitaire : les laves torrentielles. Il s'agit de coulées boueuses et rocailleuses qui dévalent le lit de certains torrents de montagne à la suite de précipitations importantes. Ces phénomènes possèdent un pouvoir de destruction considérable, et la mise en place de moyens de protection efficaces nécessite une bonne connaissance du comportement mécanique des matériaux impliqués.

Les laves torrentielles sont constituées d'un mélange d'eau et de grains solides de toutes tailles, depuis des argiles jusqu'à des blocs métriques. D'un point de vue rhéologique, une représentation intéressante de ce matériau complexe consiste à le considérer comme un mélange de particules non-colloïdales dans une matrice boueuse, elle-même formée d'eau et de

particules fines colloïdales. Diverses études de laboratoire ont montré que la matrice boueuse se comportait généralement comme un fluide viscoplastique (p. ex., Coussot and Piau, 1994). En revanche, le comportement mécanique du matériau complet (matrice et grains), aussi bien en termes de rhéologie que des éventuels processus d'évolution du mélange sous cisaillement (migration, ségrégation), reste relativement mal connu (Iverson, 2005; Ancey, 2006).

L'objectif de cette communication est de présenter un nouveau dispositif expérimental bien adapté à l'étude de l'écoulement des laves torrentielles au cours de leur phase de propagation. Pour l'instant, ce dispositif n'a été utilisé qu'avec un fluide homogène représentatif de la matrice boueuse. Le dispositif, ainsi que le fluide employé, sont présentés dans la partie 2. La partie 3 est consacrée à la description des résultats de ces expériences préliminaires. Enfin, dans la partie 4, nous expliquons comment ces résultats permettent de valider le dispositif dans la perspective de l'utiliser ensuite avec des mélanges représentatifs du matériau complet des laves torrentielles.

## 2 Dispositif expérimental

### 2.1 Principe et description du dispositif

Dans les canaux de laboratoire classiques, la phase de propagation des coulées, très transitoire, ne peut être observée que sur des durées très courtes. Au contraire, le dispositif que nous avons développé permet d'obtenir des coulées gravitaires qui sont *stationnaires* dans le référentiel du laboratoire. Il s'agit d'un canal incliné dont le fond est constitué par un tapis roulant circulant vers l'amont (Fig. 1). Le rôle de ce tapis est de s'opposer à la vitesse "naturelle" de l'écoulement de manière à obtenir une coulée globalement immobile. À l'amont, le canal est fermé par une paroi rigide perpendiculaire au fond permettant de forcer la recirculation du fluide.

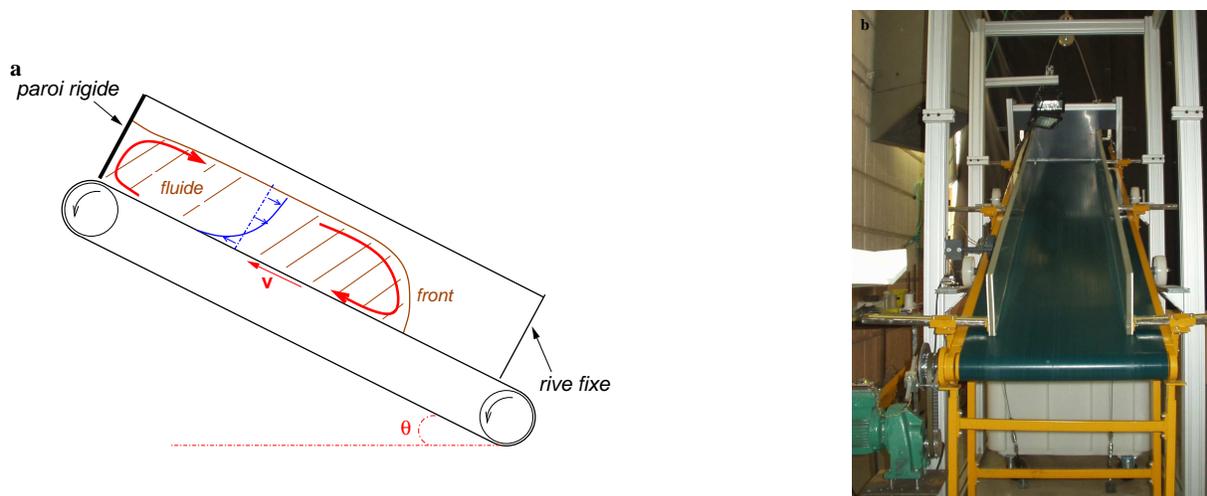


FIG. 1 – (a) Schéma de principe du dispositif expérimental développé. L'allure supposée du profil de vitesse dans l'écoulement est représentée. (b) Photo du dispositif vu de l'aval.

Le canal présente une section rectangulaire sur une longueur de 3 m (Fig. 1). Sa largeur est réglable (dans la gamme 0–0.6 m), de même que sa pente (dans la gamme 0–30°). Au fond, le tapis en PVC souple est entraîné par un moteur asynchrone permettant d'atteindre des vitesses de défilement comprises entre 0 et 1.6 m.s<sup>-1</sup>. L'étanchéité entre les rives, fixes, et le tapis mobile constitue un problème délicat. Nous n'avons pu empêcher une légère fuite de matériau, estimée à environ 1 L par expérience. Toutefois, cette fuite résiduelle est suffisamment faible pour ne pas perturber les résultats obtenus.

## 2.2 Matériau utilisé

Les expériences réalisées jusqu'à présent l'ont été avec un fluide homogène : du Carbopol (produit par la firme Noveon). Il s'agit d'un micro-gel polymérique transparent qui présente, pour une gamme de concentration massique voisine de 0.10%, des propriétés rhéologiques viscoplastiques très similaires à celles des dispersions argileuses naturelles (Oppong et al., 2006). Son comportement macroscopique, *ie* l'évolution de la contrainte cisailante  $\tau$  appliquée à un échantillon en fonction de son taux de déformation cisailante  $\dot{\gamma}$ , est bien représenté par une loi de Herschel-Bulkley (Fig. 2a) :

$$\begin{cases} \dot{\gamma} = 0 & \text{si } \tau < \tau_c, \\ \tau = \tau_c + K \dot{\gamma}^n & \text{si } \tau \geq \tau_c, \end{cases} \quad (1)$$

où  $\tau_c$  représente la contrainte-seuil du matériau,  $K$  sa consistance et  $n$  est un exposant inférieur à l'unité.

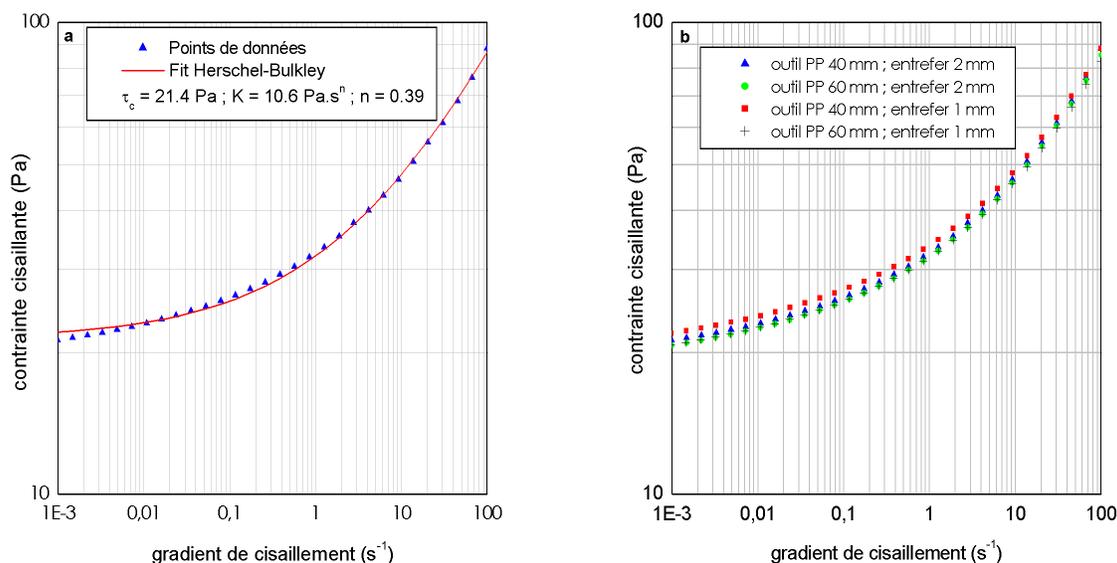


FIG. 2 – Rhéogrammes d'une solution de Carbopol à 0.10% de concentration massique, obtenus au moyen d'un rhéomètre de laboratoire de type plan-plan. (a) Ajustement des données expérimentales par une loi de comportement de Herschel-Bulkley. (b) Comparaison des rhéogrammes obtenus avec différents diamètres d'outils et différentes valeurs d'entrefer.

La rhéométrie du Carbopol est délicate en raison, notamment, de sa propension à donner lieu à du glissement sur les outils (Robert and Barnes, 2001). Ainsi pour un même matériau, et malgré l'emploi systématique d'outils rugueux, nous avons pu observer des différences de réponse non négligeables selon le diamètre et l'entrefer des outils utilisés dans nos essais rhéométriques (Fig. 2b). Il en résulte une incertitude sur les paramètres rhéologiques déterminés à partir de ces mesures. Cette incertitude a été estimée à 10% environ pour  $\tau_c$  et  $K$ , et à moins de 1% pour  $n$ .

## 3 Résultats

Nous avons réalisé des séries d'expériences consistant à étudier l'influence de la vitesse du tapis et de la pente sur l'écoulement. Pour ces expériences, la largeur du canal était fixée à 0.4 m. Le volume des échantillons était de l'ordre de 30 L, permettant d'obtenir des coulées de longueur métrique. Les écoulements ont été filmés par le côté, à travers les rives transparentes,

au moyen d'une caméra numérique. Nous avons ensuite traité les séquences d'images obtenues afin d'extraire la surface libre des coulées. Pour les résultats présentés ci-dessous, la précision de cette technique de traitement a été évaluée à  $\pm 1$  mm environ.

### 3.1 Allure des écoulements

De manière remarquable, pour toutes les pentes (dans la gamme  $7.5\text{--}22^\circ$ ) et toutes les vitesses de défilement (dans la gamme  $1\text{--}1.6\text{ m.s}^{-1}$ ) testées, les expériences ont systématiquement donné lieu à l'établissement de coulées stationnaires, présentant un front immobile, dans le référentiel du laboratoire. Les caractéristiques des coulées, et notamment leur hauteur, s'adaptent spontanément aux variations de vitesse et de pente de manière à ce que la vitesse moyenne de l'écoulement reste toujours nulle. Notons également que nous n'avons jamais observé, dans toutes ces expériences, de glissement significatif entre le Carbopol et le tapis.

La forme des coulées obtenues ne dépend pas des conditions de dépôt du fluide sur le tapis. Vues de côté (Fig. 3a et b), on peut y distinguer successivement une zone frontale, une zone d'épaisseur uniforme et une zone influencée par la paroi amont. Le front lui-même est très raide. Souvent, il présente un léger caractère ré-entrant au niveau de la ligne de contact avec le tapis. Derrière le front, la surface libre s'aplanit progressivement jusqu'à devenir parallèle au tapis dans la zone uniforme. La présence de la paroi amont, et la recirculation de fluide qu'elle induit, ne perturbent pas l'écoulement hormis dans une zone très localisée au voisinage de l'obstacle, où l'épaisseur du fluide tend en général à augmenter.



FIG. 3 – Vues des coulées obtenues dans notre dispositif. Les pentes correspondant aux différentes photos sont indiquées en légende. (a) Vue générale de côté. (b) Vue rapprochée de côté, au voisinage du front. (c) Vue de dessus, au voisinage du front.

Vu de dessus (Fig. 3c), on constate que le front ne s'incurve que légèrement au voisinage des deux rives. Ceci montre que les effets de bord sont faibles dans notre dispositif, sans doute en raison de l'égalité entre la vitesse moyenne du fluide et la vitesse des parois. Par conséquent, les coulées observées peuvent raisonnablement être considérées comme quasi-bidimensionnelles.

### 3.2 Épaisseur des coulées dans la zone uniforme

Pour une pente donnée, l'épaisseur de l'écoulement dans la zone uniforme augmente avec la vitesse du tapis (Fig. 4). Comme nos expériences sont conduites à volume de fluide constant,

cette augmentation d'épaisseur entraîne une diminution de longueur des coulées. Par ailleurs, pour une vitesse donnée, on observe également que l'épaisseur de l'écoulement dans la zone uniforme décroît avec la pente (Fig. 4).

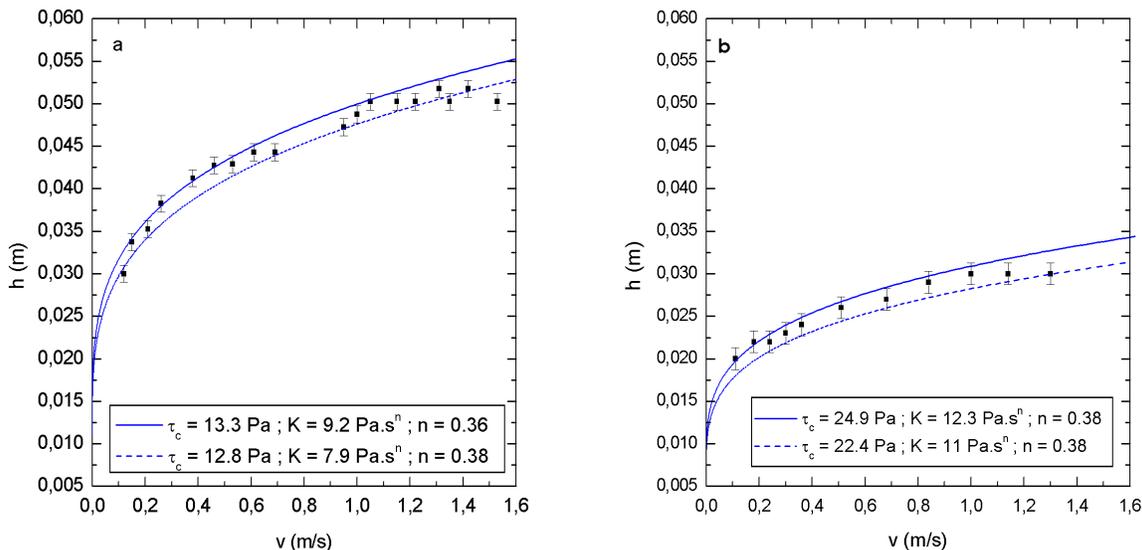


FIG. 4 – Points de données : épaisseur  $h$  des coulées mesurée dans la zone uniforme en fonction de la vitesse du tapis  $v$ . Courbes : épaisseur normale  $H_N$  en régime permanent uniforme en fonction de la vitesse moyenne  $\bar{u}$ , calculée à partir de l'équation (2). Les paramètres rhéologiques utilisés pour le calcul de ces courbes sont précisés en légende. (a) Pente  $7.5^\circ$ . (b) Pente  $22.2^\circ$ .

Ces évolutions d'épaisseur sont conformes à celles que l'on observerait, dans un canal classique (*ie* sans tapis roulant), en fonction de la vitesse moyenne des coulées et de la pente. Afin de rendre cette comparaison plus quantitative, nous avons calculé l'épaisseur normale  $H_N$  que présenterait un écoulement permanent uniforme bidimensionnel d'un fluide de Herschel-Bulkley dans un canal classique. On montre aisément (p. ex., Coussot, 1994) que cette épaisseur normale  $H_N$  est reliée à la vitesse moyenne  $\bar{u}$  de l'écoulement par :

$$\bar{u} = \frac{n}{n+1} \left( \frac{\rho g \sin \theta}{K} \right)^{\frac{1}{n}} \left( 1 - \frac{n}{2n+1} \frac{h_0}{H_N} \right) h_0^{\frac{n+1}{n}}, \quad (2)$$

où  $h_0 = H_N - \tau_c/(\rho g \sin \theta)$ ,  $\rho$  est la densité du fluide,  $\theta$  l'angle de la pente et  $g$  l'accélération de la pesanteur.

Comme le montre la Fig. 4, l'accord entre épaisseurs expérimentales mesurées dans la zone uniforme et épaisseurs normales prédites par l'équation (2) est très bon. Seuls les points expérimentaux obtenus pour les vitesses les plus grandes semblent s'écarter quelque peu de la prédiction, et ce pour les deux pentes présentées. On notera que ce bon accord est obtenu en considérant, pour le calcul des épaisseurs théoriques, une vitesse moyenne  $\bar{u}$  égale à la vitesse du tapis. Ce bon accord confirme donc, en particulier, l'absence de glissement entre fluide et tapis. Les valeurs des paramètres rhéologiques utilisées ont été déterminées indépendamment au rhéomètre. Les deux courbes théoriques tracées dans chacune des Fig. 4a et b sont représentatives du fuseau associé à l'incertitude sur ces paramètres rhéologiques (voir 2.2).

#### 4 Discussion et perspectives

Les résultats présentés ci-dessus montrent que conformément à son objectif, notre dispositif permet d'obtenir, pour une large gamme de conditions expérimentales, des coulées gravitaires

qui sont stationnaires dans le référentiel du laboratoire. En outre, le bon accord obtenu sans aucun ajustement entre épaisseurs d'écoulement expérimentales et théoriques (Fig. 4) indique que ces coulées sont identiques, à un changement de référentiel près, à celles que l'on observerait dans un canal classique. Le rôle du tapis roulant se limite, du moins dans la zone uniforme, à modifier la vitesse moyenne de l'écoulement (en la ramenant à zéro). La forme du profil de vitesse, quant à elle, reste a priori inchangée. Notons que l'accord un peu moins bon entre données expérimentales et théoriques observé aux fortes vitesses ne nous semble pas remettre cette conclusion en cause. Nous pensons que cet effet est lié à un volume de fluide insuffisant, conduisant pour les vitesses les plus grandes à des zones uniformes de longueur trop faible.

Ces résultats préliminaires constituent une validation de notre dispositif expérimental. Ils montrent en effet que ce dispositif est équivalent à un canal classique qui permettrait d'imposer facilement la vitesse moyenne des écoulements. Comme de plus, à la différence des canaux classiques (Coussot, 1994), les effets de bord y restent marginaux, notre dispositif peut également être envisagé comme un rhéomètre de grande dimension. Il permet de tester et de mesurer les propriétés rhéologiques de fluides complexes à des échelles nettement plus grandes que les rhéomètres de laboratoire usuels.

Dans la suite, ce dispositif expérimental sera utilisé avec des mélanges Carbopol – grains censés représenter le matériau complet des laves torrentielles. Les possibilités rhéométriques du dispositif seront mises à profit pour explorer le comportement mécanique de ces matériaux complexes. Les éventuels processus de ségrégation et de migration granulaire se produisant au front des coulées pourront également être étudiés avec soin. L'utilisation de mélanges fluide viscoplastique – grains pour la modélisation des laves torrentielles au laboratoire constitue une démarche originale qui n'a été que peu mise en œuvre jusqu'à présent, y compris par les équipes disposant d'équipements ressemblant au nôtre (tapis roulants, tambours tournants : p. ex., Davies, 1988; Hübl and Steinwendtner, 2000). À terme, cette démarche devrait permettre d'améliorer la connaissance du comportement des laves durant leur phase de propagation et, par suite, les moyens de s'en prémunir.

## Références

- Ancey, C. (2006). Plasticity and geophysical flows : A review. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, in press, doi :10.1016/j.jnnfm.2006.05.005.
- Coussot, P. (1994). Steady, laminar, flow of concentrated mud suspensions in open channel. *J. Hydraul. Res.*, **32(4)** 535–559.
- Coussot, P. and Piau, J.-M. (1994). On the behavior of fine mud suspensions. *Rheol. Acta*, **33** 175–184.
- Davies, T. R. H. (1988). Debris flow surges - A laboratory investigation. *Mitt. des Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*, **96** 1–122.
- Hübl, J. and Steinwendtner, H. (2000). Estimation of rheological properties of viscous debris flow using a belt conveyor. *Phys. Chem. Earth B*, **25(9)** 751–755.
- Iverson, R. M. (2005). Debris-flow mechanics. In *Debris-flow hazards and related phenomena* (ed. M. Jakob et O. Hungr), pages 105–134. Springer, Berlin Heidelberg.
- Oppong, F. K., Rubatat, L., Frisken, B. J., Bailey, A. E., and de Bruyn, J. R. (2006). Microrheology and structure of a yield-stress polymer gel. *Phys. Rev. E*, **73(4)** 041405.
- Robert, G. P. and Barnes, H. A. (2001). New measurements of the flow-curves for Carbopol dispersions without slip artefacts. *Rheol. Acta*, **40** 499–503.