

Modèles de couche mince pour les fluides à seuil : formulations alternatives et confrontation avec des résultats expérimentaux

G. CHAMBON^{a,b}, P. FREYDIER^{a,b}

a. IRSTEA, UR ETNA, Grenoble, France (guillaume.chambon@irstea.fr)

b. Université Grenoble Alpes

Résumé :

Nous présentons des résultats expérimentaux originaux concernant la forme et la dynamique interne de coulées gravitaires à surface libre de fluides viscoplastiques. Ces résultats sont ensuite exploités dans le but de tester et améliorer les modèles hydrauliques de type couche mince développés pour simuler ces écoulements. Nous discutons notamment la validité des relations de fermeture classiquement utilisées pour les fluides à seuil et la contribution de termes additionnels prédits par des modèles de nouvelle génération développés récemment.

Abstract :

Original experimental results on the shape and internal dynamics of gravity-driven, free-surface surges of viscoplastic fluids are presented. These results are then exploited to test and improve the shallow-flow hydraulic models used to simulate the propagation of such surges. We discuss in particular the validity of the closure relations classically postulated for yield stress fluids, and the contribution of additional terms predicted by recently-developed new-generation models.

Mots clefs : modèle de couche mince ; fluide à seuil ; Carbopol ; rhéologie, loi de Herschel-Bulkley ; vélocimétrie optique

1 Introduction

Les modèles permettant de simuler la propagation des écoulements géophysiques à surface libre (coulées de boues, avalanches,...) sont généralement fondés sur une approximation de couche mince et sur une formulation moyennée dans l'épaisseur (modèles *shallow-flow*) [1]. Dans ce cadre, la structure verticale de l'écoulement devient un ingrédient du modèle, qui doit être pris en compte afin d'obtenir un système d'équations fermé. La dérivation de tels modèles *shallow-flow* pour les fluides présentant une rhéologie complexe, et notamment les fluides à seuil, se heurte à des difficultés importantes du fait de l'existence de zones non-cisaillées (*plugs*) dans lesquelles la viscosité apparente diverge. Les outils classiques utilisés dans les applications opérationnelles reposent ainsi sur des hypothèses fortes et peu contrôlées consistant à extrapoler les profils de vitesse et de pression établis en régime permanent uniforme ou en régime de lubrification (inertie négligée). Récemment, des

développements mathématiques ont permis de relaxer certaines de ces hypothèses et d'aboutir à une nouvelle génération de modèles *shallow-flow* complètement consistants avec les équations primitives [2]. Toutefois, si l'on reste dans le cadre de modèles à une couche, une hypothèse sur la forme du *plug* reste nécessaire. Des modèles bi-couches, dans lesquels l'épaisseur locale du *plug* est traitée comme une variable additionnelle, ont également été proposés [3].

L'objectif de cette étude est de tester et comparer les différents modèles hydrauliques développés pour les fluides complexes en les confrontant à des données expérimentales fines et bien documentées. Nous considérerons essentiellement le cas de lois constitutives de type viscoplastique qui peuvent représenter, en première approximation, le comportement mécanique d'écoulements géophysiques tels que les coulées de boue ou certains types d'avalanches de neige [1].

2 Méthodologie

Nos expériences sont réalisées dans un canal à fond mobile (tapis roulant) permettant de générer des coulées gravitaires qui restent globalement stationnaires, avec un front fixe, dans le référentiel du laboratoire. Les coulées sont constituées de fluides viscoplastiques modèles (Carbopol) dont le comportement mécanique est bien décrit par la loi de Herschel-Bulkley et présentant des seuils de contrainte dans la gamme 5-20 Pa. À des fins de comparaison, des expériences avec des fluides Newtoniens ont aussi été réalisées. L'utilisation de fluides transparents, inséminés par des traceurs (billes creuses de 10 μm), permet d'accéder à la dynamique interne des écoulements grâce à la mise en œuvre de techniques de vélocimétrie optique. Les propriétés rhéologiques (contrainte-seuil, consistance, indice d'écoulement) des fluides sont déterminées à la fois par des essais rhéométriques classiques, et grâce à l'exploitation des relations vitesse-épaisseur mesurées dans les zones uniformes des coulées [4].

3 Résultats

Deux propriétés des coulées sont mesurées systématiquement en fonction des paramètres de contrôle de l'expérience (vitesse basale imposée, angle de pente, contrainte-seuil et consistance des fluides) : (1) la forme de la surface libre dans la zone du front, (2) le champ de vitesse à l'intérieur de l'écoulement et, en particulier, la forme de la zone *plug*. Ces données expérimentales sont ensuite confrontées aux prédictions de modèles hydrauliques de type couche mince. Nous montrons notamment que l'évolution du *plug* mesurée dans les expériences, avec une forme qui s'amincit progressivement vers le front, semble en accord avec les relations de fermeture reposant sur l'hypothèse de lubrification. Toutefois, une différence systématique est observée entre la forme de la surface libre prédite par ces modèles de lubrification et les résultats expérimentaux (Figure 1). Nous avançons que cette différence pourrait s'expliquer par la prise en compte de termes additionnels présents par les modèles de nouvelle génération et liés à l'existence de contraintes normales dans le *plug*.

Ces résultats offrent des pistes prometteuses pour améliorer les modèles opérationnels employés pour simuler la propagation des écoulements gravitaires rapides et, surtout, pour quantifier les incertitudes associées aux hypothèses de modélisation.

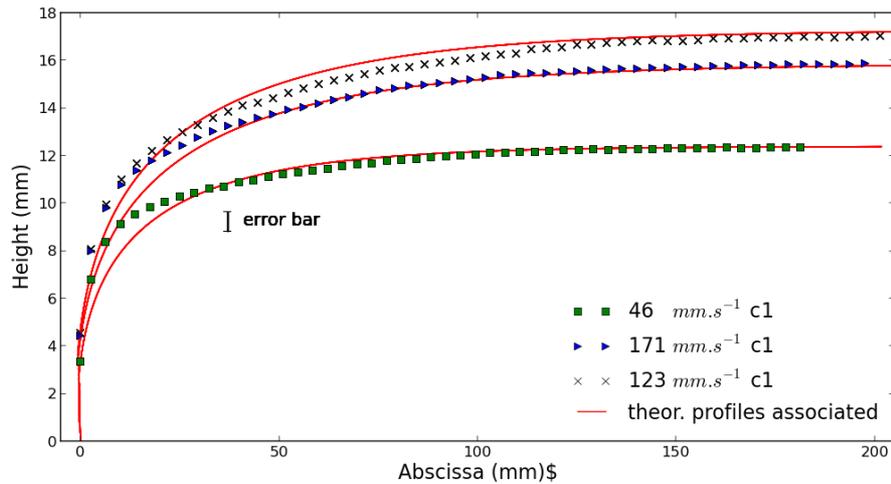


Figure 1 : Forme du front mesurée expérimentalement pour différentes valeurs de la vitesse basale imposée et comparaison aux prédictions d'un modèle de couche mince fondé sur l'hypothèse de lubrification.

Références

- [1] C. Ancey, Plasticity and geophysical flows: A Review, *J. Non-Newton. Fluid* 142 (2007) 4-35
- [2] E.D. Fernandez-Nieto, P. Noble, J.P. Vila, Shallow Water equations for Non-Newtonian fluids, *J. Non-Newton. Fluid* 165 (2010) 712-732
- [3] N. J. Balmforth, J. J. Liu, Roll waves in mud, *J. Fluid Mech.* 519 (2004) 33-54
- [4] G. Chambon, A. Ghemmour, M. Naaim, Experimental investigation of viscoplastic free-surface flows in steady uniform regime, *J. Fluid Mech.* 754 (2014) 332-364