

Avalanches en laboratoire

Le développement de toute science est en grande partie conditionné par l'existence d'une base expérimentale solide. Seule en effet l'expérience permet de collecter mesures et observations tout en permettant de tester les hypothèses théoriques de façon systématique et contrôlée. Dans les sciences de l'environnement, l'expérience est possible, mais elle est ardue à conduire. Par exemple, dans le domaine de l'hydraulique torrentielle, il est très difficile voire impossible de forcer le déclenchement d'une lave torrentielle pour en étudier le mouvement. Cela a poussé les scientifiques à étudier des écoulements à échelle réduite en recréant des écoulements qui ressemblent aux écoulements naturels.

Un pionnier en la matière a été Richard Iverson de l'USGS, qui avec son équipe a construit un canal long de 100 m dans l'Orégon, pour créer des laves torrentielles à échelle réduite. Un point délicat dans ce type d'expérience est la similitude avec les écoulements naturels. En mécanique des fluides, la théorie de la similitude fixe les critères à suivre dans le choix de la taille de l'expérience et des fluides à employer pour que l'écoulement à échelle réduite soit représentatif de ce qui passe à une autre échelle. La théorie reste assez simple à mettre en œuvre dès lors qu'on travaille avec des fluides usuels comme l'eau et l'air car il faut peu de paramètres géométriques et physiques pour décrire une expérience ; elle devient autrement plus complexe à employer lorsque la description du problème introduit un grand nombre de paramètres (comme la taille des grains, leur forme et leur rugosité, la viscosité du fluide, les masses volumiques, etc.). Dans la plupart des cas, on ne peut jamais réaliser une expérience en similitude complète, tout au plus peut-on assurer qu'une similitude partielle existe.

Cette marge de manœuvre a profondément divisé la communauté scientifique : d'un côté, il y a une école dont le chef de file

est Richard Iverson et qui pense qu'il faut rester dans des conditions expérimentales les plus proches possibles du phénomène naturel (d'où le canal de grande taille construit dans l'Orégon et les expériences menées avec des matériaux naturels) pour introduire le moins de biais possible dans les expériences. D'un autre côté s'est développée une approche mécaniste sous l'impulsion de plusieurs groupes, dont sans doute le pionnier a été Tamotsu Takahashi au Japon, et qui met l'accent sur la nécessité de comprendre le comportement rhéologique de matériaux modèles en laboratoire avant de développer des modèles théoriques d'écoulement.

Quelle que soit l'approche choisie pour conduire des expériences sur le comportement d'une coulée de débris, le modèle d'écoulement choisi pour calculer les caractéristiques d'une lave torrentielle est un jeu d'équations à la Saint-Venant, c'est-à-dire le même jeu d'équations qui sert à décrire la propagation d'une crue dans un cours d'eau (conservation de la masse et de la quantité de mouvement sur une section d'écoulement). Naturellement les équations ont été quelque peu adaptées pour tenir compte du matériau mobilisé. C'est là que surgit le second objet de vifs débats au sein de la communauté scientifique : tout observateur avisé a en effet noté qu'une lave torrentielle est un écoulement fortement structuré (structure avec un front, un corps, et une queue aux comportements distincts) et le lieu d'une multitude de processus variés (déposition/érosion de sédiment, ségrégation, formation de bourrelets latéraux). L'observation de terrain ainsi que les expériences d'Iverson montrent que les éléments structurants de l'écoulement (front granulaire, bourrelet) sont fondamentaux et permettent d'expliquer qualitativement les différences de comportement (par exemple, étalement ou distance parcourue) entre deux coulées de débris. On peut alors se demander si d'une part, la compréhension de la structuration n'est pas l'élément-clé indispensable à la compréhension plus globale de la dynamique des écoulements et si d'autre part, les équations de Saint-Venant offrent un cadre de modélisation approprié.

C'est dans cette problématique que s'insère la recherche au sein de notre laboratoire. Notre objectif est d'arriver à décrire le plus simplement possible la façon dont une masse finie de matériaux s'écoule sur un plan incliné ou dans un canal. Expérimentalement, nous sommes intéressés non seulement à suivre précisément le mouvement de la masse (hauteur et vitesse d'écoulement), mais également à caractériser sa structure interne. Comme techniques de mesure, nous avons principalement développé des méthodes fondées sur le traitement d'images. Par exemple, pour déterminer l'évolution de la hauteur au cours du temps, nous avons développé un système de projection de motifs géométriques : en effet, si l'on projette une alternance de bandes sombres et claires et qu'on mesure comment la surface libre de l'écoulement perturbe leur projection, on peut en déduire une épaisseur de fluide. D'autres techniques fondées sur la vélocimétrie par suivi de particules permettent de visualiser la structure de l'écoulement et de déterminer, par exemple, le profil de vitesse et de concentration d'une suspension de particules (sous réserve que la suspension soit transparente).

Le programme expérimental est relativement simple. Un réservoir contient un certain volume de fluide. Nous utilisons différents fluides sans nous soucier de leur similitude aux débris naturels. Par exemple, nous avons réalisé des expériences sur du sucre fondu (un fluide newtonien très visqueux) et un gel polymérique utilisé en cosmétique comme gel fixateur pour les cheveux (fluide viscoplastique). Nous sommes en train de tester des suspensions de particules dans un fluide ; dans ce cas-là, pour avoir un matériau transparent, il faut se livrer à de savantes manipulations pour doser un mélange de fluides interstitiels de telle sorte que l'indice de réfraction soit identique dans les particules et dans le fluide.

À l'instant initial, la porte du réservoir est ouverte soudainement à l'aide de deux puissants vérins et libère en quelques secondes le fluide sur le plan incliné. Le mouvement

est ensuite suivi par une caméra et les images sont traitées pour en tirer les grandeurs qui nous intéressent. En parallèle, des solutions analytiques et des résultats de simulations numériques peuvent être comparés aux données expérimentales ainsi acquises.

La grande force de ce dispositif est qu'on peut mesurer précisément par des moyens non invasifs les grandeurs caractéristiques de l'écoulement dans un environnement contrôlé. Dans ce dispositif, les expériences peuvent être répétées, les paramètres peuvent être imposés ou contrôlés à volonté. Parmi les résultats que nous avons publiés, nous avons observé un comportement assez curieux des écoulements viscoplastiques. La comparaison entre théorie et expérience donne de bons résultats à pente relativement forte, mais à pente douce, l'allure de la courbe $x_f(t)$ donnant la position du front en fonction du temps diffère même si par ailleurs les profils étaient corrects et l'ordre de grandeur de $x_f(t)$ était bien prédit par la théorie. On a imaginé différents scénarios pour comprendre la raison pour laquelle le front accélérât légèrement à faible pente contrairement à ce que prévoit la théorie. Nous avons observé dans nos expériences que des zones faiblement cisailées, précurseurs des bourrelets latéraux se développaient sur les bords et qu'elles se figeaient brutalement ; l'écoulement voyait aussi sa section d'écoulement réduite, ce qui avait pour effet de légèrement accélérer le front. Cela fournit une illustration supplémentaire de l'importance de la structuration de l'écoulement dans la dynamique globale. L'analyse se fondant sur une approximation bidimensionnelle de l'écoulement, la théorie est incapable de reproduire ce type de comportement et il faut recourir à une simulation numérique complète pour résoudre ce problème. Cela reste, là encore, une tâche difficile, qui nécessite des moyens informatiques conséquents.

À travers cet article, nous avons tenté de montrer que si très tôt les scientifiques se sont accordés à attribuer un rôle-clé

à l'expérimentation, l'expérience en sciences de l'environnement reste un sujet difficile et polémique. Nous avons dressé ici quelques-uns des débats qui partagent la communauté scientifique autour des laves torrentielles. Comme quelques équipes dans le monde, notre laboratoire s'intéresse particulièrement à mieux comprendre comment un écoulement d'une masse finie de matériaux s'organise sur un plan incliné. Nous ne prétendons pas là reproduire de façon exacte le comportement des laves torrentielles, mais nous espérons pouvoir dégager quelques principes physiques généraux qui permettent de mieux appréhender la dynamique des écoulements naturels. Couplés à la mesure et à l'observation in situ, les concepts que nous développons ou testons doivent permettre de fournir des outils puissants de calcul des laves torrentielles.