

Simulation des avalanches : modélisation et analyse numérique

Workshop « *Simulation of avalanches : modelling and numerics* », 11-14 mars 2014, Séville

Organisation : Didier Bresch (CNRS, Université de Savoie), Enrique Fernandez-Nieto (Université de Séville), Paul Vigneaux (ENS de Lyon)

Synthèse : Christophe Ancey, François Bouchut, Yoël Forterre, Guillaume Ovarlez, Paul Vigneaux

Objectifs-Thèmes abordés

Ce workshop ([site web](#)) consistait à rassembler des chercheurs dans les domaines de la modélisation et du développement de schémas numériques pour certains aspects de la simulation des avalanches (de neige, de débris ou sous-marines, en lien avec la génération de tsunamis). Cette session prospective s'est plus particulièrement concentrée sur :

- la modélisation des matériaux viscoplastiques ;
- la modélisation des écoulements granulaires ;
- les nouvelles méthodes numériques adaptées à ces modèles.

Ainsi, ce workshop visait à compléter sur certains points le colloque organisé en septembre 2013 à Toulouse par J. P. Vila, J. Monnier et P. Noble et dont la synthèse remarquable est dans le document ARP. Par souci de rationalisation du document global, des liens y sont donnés dans la présente synthèse.

Organisation-Intervenants

L'idée a été de favoriser au maximum les discussions et les échanges interdisciplinaires sur une période de 4 jours. Dans ce but, 5 physiciens et 5 mathématiciens ont réalisé des exposés d'une heure, suivis d'une heure de discussion. Deux sessions prospectives ont permis de revenir de manière croisée sur une série de problèmes ouverts.

Les exposés ont été présentés par :

Christophe Ancey (EPFL, Suisse), Patricio Bohorquez (Université de Jaen, Espagne), François Bouchut (CNRS, France), Manuel Castro (Université de Malaga, Espagne), Yoel Forterre (CNRS, France), Daniel Le Roux (Université de Lyon, France), Anne Mangeney (IPGP, France), Guillaume Ovarlez (CNRS, France), Vladimir Shelukhin (Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Russie), Paul Vigneaux (ENS de Lyon, France).

Enjeux de modélisation

Les modèles de type écoulements peu profonds (théorie de la lubrification ou modèles intégrés) étaient ceux majoritairement décrits au cours de ce groupe de travail. Le passage de ces modèles du cadre newtonien (qui est bien compris actuellement) au cadre non newtonien (plasticité, loi puissance) a significativement progressé mais nécessite d'être mieux compris (on peut se reporter à la synthèse de Toulouse pour plus de détails). D'un point de vue expérimental, le problème de la ligne du front est largement méconnu : les expériences et les observations sont difficiles, le fond et la présence des bords complexifient l'hydrodynamique proche du front, etc. Du point de vue de la modélisation des avalanches granulaires, les modèles utilisent classiquement des équations de Saint-Venant phénoménologiques en supposant un profil de vitesse « plug » et une loi de friction basale constante. Peut-on établir des modèles intégrés dans l'épaisseur directement à partir des lois constitutives 3D qui ont été récemment proposées (rhéologie $\mu(I)$) ?

Une bonne part des discussions a porté sur les aspects rhéologiques. On sait classiquement que de nombreux types de matériaux sont utilisés pour réaliser les expériences physiques et que leur caractérisation n'est pas forcément triviale dans les situations les plus générales. Les démarches de modélisation travaillent notamment sur la construction de lois de comportement aussi universelles que possible, basée sur l'étude expérimentale de matériaux très différents pour éviter d'être réduit à une classe particulière de comportement.

Il ressort qu'actuellement, même si de nombreux progrès ont été réalisés dans la compréhension des matériaux, viscoplastiques notamment, certains problèmes de description subsistent. À titre d'exemple, on peut évoquer le cas du Carbopol qui est utilisé dans les expériences et nécessite une étape préalable de préparation : cela rend délicate la comparaison entre les expériences car il est difficile d'établir un protocole standard qui permette d'assurer que le matériau obtenu soit identique. Pour ce matériau, il y a aussi la question de son évolution dans le temps lorsque les expériences doivent durer sur de longues périodes. Enfin, ces matériaux sont fortement élastiques, et cette propriété doit jouer un rôle dans certains écoulements (par exemple, l'écoulement autour d'obstacles). La question se pose également pour les milieux granulaires. La plupart des expériences sont faites sur des milieux modèles composés de particules sphériques. La pertinence des lois établies pour des particules et/ou milieux plus complexes (forme irrégulière, milieu polydisperse, milieux cohésifs, etc) est une question importante encore ouverte.

La modélisation rhéologique classique des fluides viscoplastiques utilise les modèles de Bingham ou d'Herschel-Bulkley. Pour les milieux granulaires, une loi viscoplastique frictionnelle a récemment été proposée (rhéologie $\mu(I)$) qui se réduit au modèle de Drucker-Prager dans la limite quasi-statique) : sa forme est proche du modèle de Bingham mais le seuil et la viscosité dépendent de la pression. Ces lois constitutives sont capables de décrire certaines situations tridimensionnelles complexes (effondrement d'une masse, instabilité de surface, etc). Cependant, ces lois simples, souvent établies dans des configurations de cisaillement simples, ne décrivent pas encore l'ensemble des comportements rhéologiques de ces milieux. Nous listons ci-dessous certains points encore non décrits par les rhéologies classiques.

Pour les fluides à seuil :

- Seuil d'écoulement. En partant d'un état liquide, le critère de von Mises semble être assez robuste. Par contre, lorsque l'on part de l'état solide, il n'est pas le plus adapté car il ne rend pas compte de l'anisotropie observée expérimentalement : quel serait alors un bon critère ? Plus généralement, la caractérisation des zones déstabilisées/de rupture est un point crucial qui demande à être mieux compris (lien typique avec les zones de départ dans le cas des glissements de terrains et des avalanches ; cf. aussi la synthèse de Toulouse sur ce point).
- Lois élasto-visco-plastiques (notamment en lien avec certains écoulement géophysiques).
- Dépendance à l'histoire du cisaillement.

Pour les milieux granulaires et les suspensions :

- Milieux granulaires secs, au-delà de la rhéologie $\mu(I)$: écoulements quasi-statiques (hystérésis, bande de cisaillement, effets de taille finie, besoin d'approche non locale), transition vers les régimes dilués (théorie cinétique, ...), rôle de la préparation initiale (dilatance).
- Pour les suspensions concentrées newtoniennes : étude de la viscosité et des contraintes normales pour les concentrations élevées, rôle de la rugosité, rôle du gradient dans les lois de comportement, couplage avec la mécanique des sols (présence de plug du fait d'une concentration au-delà d'une valeur critique), prédiction de la dépendance de l'histoire du cisaillement relativement à la micro-structure.
- Lorsqu'on traite de suspensions, se pose la question de l'extension de propriétés linéaires vers le non-linéaire (e.g. équations de migration associées à la contrainte particulière).

- Pour revenir aux mécanismes microstructuraux, dans le cas des suspensions, la notion de contact hydrodynamique entre particules est une source de problèmes ouverts pour mieux comprendre son impact sur la rhéologie (anisotropie, contrainte particulaire et les inhomogénéités induites par écoulement). Il y a, à l'heure actuelle, une étude essentiellement basée sur la dynamique stokesienne et l'on se demande si l'on ne pourrait pas aborder des problèmes comme la rugosité hydrodynamique avec d'autres méthodologies qui restent à mettre au point.
- Equation diphasique : quelles lois constitutives ? migration ? couplage entre la dilatance et la rhéologie viscoplastique dans les modèles à deux phases. Dans le cas d'écoulements « stick-slip » pour les suspensions de particules concentrées, il faut mieux comprendre la théorie d'Iverson et les effets de la pression interstitielle.

Dans l'idéal, un des moyens qui pourraient rassembler les communautés modélisations et mathématiques serait d'avoir une série de benchmarks robustes (reproductibilité, caractérisation, etc) sur lesquels on pourrait comparer les expériences, les solutions analytiques éventuellement disponibles et les simulations numériques. Il semble qu'il y ait encore du travail pour arriver à cela. Que ce soit pour déterminer des matériaux ou des expériences 3D qui seraient de bons candidats ou des méthodes numériques adaptées. Dans cette attente et en parallèle, au vu des nombreuses expériences physiques et des méthodes numériques disponibles, une autre approche sur laquelle les communautés peuvent interagir est de recenser conjointement (et il est clair qu'il en existe) : une liste de données expérimentales disponibles, une liste de problèmes ouverts associés et une série de questions communes. L'établissement de nouveaux modèles mécaniques thermodynamiquement consistants pour les difficultés associées aux écoulements géophysiques est un aspect de développement à poursuivre et qui fera un lien naturel entre les deux communautés.

Enjeux mathématiques et de simulation

Les problèmes de la section ci-dessus sont naturellement reliés à des enjeux mathématiques et numériques.

Ainsi peut-on mentionner les travaux à mener pour déterminer les propriétés qualitatives des modèles considérés, leur caractère bien posé, etc. Du côté numérique, il faut construire des schémas de résolution consistants et améliorer les temps de calcul (tant via l'aspect algorithmique que via l'aspect matériel sur les architectures émergentes). Les méthodes numériques classiques ne sont généralement pas adaptées lorsque l'on passe des modèles newtoniens aux modèles non-newtoniens (voir plusieurs aspects dans la synthèse de Toulouse).

En ce qui concerne la rhéologie $\mu(I)$ par exemple, des travaux récents permettent de classifier les zones où le modèle est mal ou bien posé. Cette étude est réalisée sur un écoulement de base stationnaire. Qu'en est-il pour le cas d'un effondrement granulaire ? L'écoulement est instationnaire et la réponse à ce problème difficile permettrait d'éclairer les situations plus proches des applications. Par ailleurs, peut-on revisiter la rhéologie $\mu(I)$ avec une vision micro-macro par homogénéisation ?

L'approche homogénéisation intervient évidemment aussi dans l'étude des modèles multifluides/multiphasés où de nombreux aspects restent à comprendre.

Les questions liées à la rugosité font actuellement l'objet d'une intense activité dans la communauté de l'analyse mathématique et des interactions avec les physiciens permettraient de synchroniser ces connaissances pour faire fructifier les deux courants.

Pour les écoulements considérés, une attention particulière est portée aux approximations multicouches pour les écoulements multidimensionnels. Les enjeux sont importants en terme de modélisation et de gain à espérer en temps de calcul lors des simulations.

Les problèmes d'assimilation de données, d'analyse de sensibilités et d'estimation de paramètres ont aussi été évoqués (à ce propos, on peut se reporter à la synthèse de Toulouse).

Les aspects HPC sont évidemment à prendre en compte pour aller vers des applications réalistes en géophysique (et avec des temps de calcul raisonnables) : la parallélisation et l'utilisation de matériels variés (CPU, GPU, etc) demandent la mise au point de méthodes mathématiques/numériques/informatiques nouvelles pour être efficaces. Les codes subtils d'hier peuvent devenir inefficaces sur ces nouvelles architectures.

Enjeux de transmission

Ces aspects ont déjà été évoqués plus haut mais relèvent de plusieurs types d'acteurs.

D'une part, il est apparu un premier besoin sur la communication entre les communautés modélisation et mathématique : des schémas numériques sophistiqués et très récents ne sont pas suffisamment exportés vers la communauté des physiciens alors que cela leur serait très utile. Réciproquement, le développement des méthodes doit se nourrir des modèles les plus récents pour renouveler des questions mathématiques de qualité au regard des enjeux physiques actuels. La tâche n'est pas triviale mais elle est une source de saine progression. D'un point de vue pratique, il serait bienvenu de mettre en place des ateliers de formation pour les utilisateurs et éventuellement des « plates-formes » pour une maintenance pérenne et une diffusion facilitée des méthodes numériques/codes « libres » (on peut penser à l'exemple de *Clawpack*, *Gerris*, etc.).

D'autre part, il semble qu'il y ait aussi un véritable enjeu de médiation scientifique à réaliser auprès de la société. En effet, dans le domaine des avalanches, par exemple, l'utilisation des développements académiques peut se retrouver sur des tâches d'ingénierie très « exposées » sur les plans sociétal et juridique. Il y a donc un travail important à réaliser auprès des acteurs concernés sur l'état de l'art des connaissances académiques et ce qu'elles permettent d'obtenir en termes de précision des prévisions (à ce sujet, on pourra par exemple lire l'écho qu'en a donné *le Monde* dans son édition du 26 février 2014 – supplément Sciences & Médecine).