Nouveaux dispositifs d'étude

- Visualisation laser — La méthode du plan lumineux
- Ecoulements granulaires et avalanches de neige pulvérulente

New research devices

- *Laser display — Light plane method*
- *Granular flows and powder snow avalanches*

P. Béghin

Division Nivologie, CEMAGREF, Grenoble*

Visualisation laser La méthode du plan lumineux

Dans toute modélisation physique d'écoulement fluide, il est important de pouvoir visualiser de manière globale les mouvements du fluide, afin de mieux appréhender la dynamique des écoulements.

Les méthodes de visualisation sont un complément de plus en plus indispensable aux mesures fines effectuées sur les variables qui entrent en jeu dans les écoulements que l'on veut étudier. Outre les résultats quantitatifs qu'elles peuvent fournir, elles permettent d'orienter les recherches lorsque l'on se trouve en face de phénomènes mal perçus.

Le développement du laser, au cours de ces dernières années, a permis de faire de grands progrès dans le domaine de la visualisation.

Depuis une dizaine d'années, la Division Nivologie du CEMAGREF a développé, en collaboration avec l'IMG (Institut de mécanique de Grenoble), la modélisation physique en canal noyé des avalanches de neige poudreuse. Dans ce type de phénomènes, assimilables aux courants de turbidité (écoulements d'une paroi solide), la dynamique interne des écoulements est difficile à étudier. Il s'agit en effet, d'écoulements instationnaires dont la durée est brève et qui se prêtent mal à des mesures fines (structures fines de la turbulence par exemple).

Nous avons donc été conduit à développer la visualisation laser en mettant au point la méthode du plan lumineux, utilisable non seulement sur les expériences en canal noyé, mais également sur les expériences prévues dans la veine noyée en cours de construction (simulation du snow-drift).

Après l'acquisition du matériel, une période de mise au point a été nécessaire pour que la méthode de visualisation puisse donner des résultats satisfaisants.

La méthode du plan lumineux

Principe

Il s'agit de visualiser en cours d'écoulement les mouvements internes du fluide en suivant les trajectoires de micro-particules disséminées dans le fluide et éclairées par un rayon laser. Le but est d'obtenir un plan lumineux d'épaisseur aussi faible que possible afin que les particules en déplacement, observées dans un temps très court, indiquent le champ des vitesses du fluide dans le plan.

Description de la méthode (Fig. 1)

Elle consiste à faire balayer un rayon laser, réfléchi par un petit miroir plan en oscillation, pour obtenir un secteur lumineux intense, de très faible épaisseur et de largeur réglable. Le miroir est monté sur l'axe d'un galvanomètre de très faible inertie, commandé par une électronique permettant de régler l'amplitude et la fréquence d'oscillation du miroir. L'amplitude d'oscillation du miroir pouvant atteindre 25°, on obtient un balayage optique de 50°. Les particules en suspension dans le fluide et qui se déplacent dans le secteur lumineux sont éclairées instantanément à chaque passage du rayon laser.

Un appareil photo est placé dans l'axe perpendiculaire au plan lumineux. Les photos prises permettent de visualiser pour chaque particule, une succession de points brillants correspondant aux positions de la particule à

* B.P. 76, 38402 Saint-Martin-d'Hères.

Figure 1 — Méthode du plan lumineux.

Figure 2 — Visualisation laser appliquée aux expériences en bassin.

Figure 3 — Visualisation laser — Vue du dessus des installations.

Figure 4

5

6

7

8

9

Figure 5 — Écoulement sur pente en repère photo immobile. Distorsion importante du vortex interne.

Figure 6 — Écoulement sur pente. Repère photo immobile. Visualisation des mouvements du fluide ambiant.

Figure 7 — Écoulement sur faible pente. Repère lié à l'écoulement. On distingue un unique vortex en arrière du front.

Figure 8 — Écoulement sur pente. Repère lié à la partie arrière de la bouffée. Mise en évidence du vortex arrière.

Figure 9 — Écoulement sur pente. Aucun vortex n'est distinctement visible.

chaque passage du rayon laser. L'espacement des points dépend de la fréquence de balayage et de la nature de la particule. En mesurant cet espacement, on peut estimer le secteur vitesse de l'écoulement en ce point. Il est cependant nécessaire de faire les mesures entre un point et le deuxième point consécutif : en effet, suivant la position de la particule dans le secteur lumineux, le laps de temps qui s'écoule entre deux passages consécutifs du laser sur la particule est différent. En revanche, entre le premier passage et le 3^e, il s'écoule une période de balayage, à condition toutefois que la vitesse de la particule soit négligeable devant la vitesse de balayage.

Sur l'appareil photo, on prend un temps d'ouverture nettement supérieur à la période de balayage du rayon laser. Si le temps d'ouverture est trop grand, on obtient un réseau de points lumineux difficile à exploiter car les trajectoires s'imbriquent les unes dans les autres.

Matériel utilisé

Dans nos expériences, nous avons utilisé un laser Hélium-Néon de 15 mW de puissance (modèle Spectra-Physics 124 B), ainsi qu'un scanner (ensemble galvanomètre-miroir) pouvant osciller jusqu'à 400 Hz (modèle Optilas G 100 PD). L'électronique de contrôle du scanner (modèle CCX 650) permet de régler la fréquence et l'amplitude du balayage optique. La fréquence est mesurée à l'aide d'un oscilloscope couplé. Le miroir étant de très faibles dimensions (7 mm × 11 mm), son support doit être rendu solidaire du laser dans les déplacements éventuels en cours d'expérience.

Application aux expériences en modèle noyé (Fig. 2 et 3)

Cette méthode de visualisation a été mise au point sur le bassin utilisé pour modéliser les bouffées de densité (volume donné de fluide lourd s'écoulant dans un fluide ambiant), en relation avec les phénomènes d'écoulements de sable sous-marins et les avalanches de poudreuses.

Le bassin (6 mètres de long, 3 mètres de large, 1 mètre de profondeur) permet d'étudier les écoulements tri-dimensionnels. Dans un premier temps, la visualisation laser a été utilisée sur des écoulements canalisés (bi-dimensionnels), suivant l'axe du canal.

L'ensemble laser-scanner est placé sur un chariot mobile, 1 mètre au-dessus de la surface de l'eau. Avec l'amplitude de balayage disponible, il est possible de visualiser l'écoulement sur 1,50 m à 2 mètres. L'appareil photo est placé sur le côté du bassin et peut se déplacer sur un chariot mobile à la vitesse du front de l'écoulement.

Dans nos expériences, le fluide dense (eau salée) est versé dans un réservoir d'injection de quelques litres. Il doit être incolore afin que l'on puisse correctement visualiser les particules en suspension.

Il est nécessaire d'utiliser des particules suivant aussi fidèlement que possible les variations de vitesse du fluide.

Elles doivent avoir une vitesse de chute u_c en eau calme négligeable devant la vitesse moyenne des écoulements. Or, dans le domaine des faibles vitesses :

$$u_c = kd^2(\rho_p - 1)$$

d , ρ_p : diamètre et masse volumique des particules.

On a donc intérêt à utiliser des particules de densité proche de celle de l'eau et de diamètre aussi faible que possible. Des particules trop fines, cependant, ne sont plus visibles sur les photos, d'autant plus que la tranche d'eau qui sépare le plan lumineux de l'appareil photo est importante (1,50 m).

Nous avons utilisé 4 sortes de particules :

- les paillettes d'aluminium de formes très planes (dimensions de l'ordre du mm);
- les sciures de bois : granulométrie de l'ordre de 100 μ à 200 μ ou 300 μ à 400 μ ; $u_c \approx 2$ mm/seconde et $u_c \approx 10$ mm/seconde;
- les particules de polystyrène : granulométrie de l'ordre de 100 μ (sphérique); $u_c \approx 0$;
- les particules de polystyrène aluminisé : granulométrie de l'ordre de 50 à 100 μ (sphérique); $u_c \approx 1$ mm/sec.

Les meilleurs résultats ont été obtenus à l'aide des sciures fines et des particules aluminisées.

Déroulement des essais

Le local dans lequel est situé le bassin est mis dans l'obscurité complète. Le bassin lui-même est recouvert de tissu noir, afin d'éliminer toute lumière parasite. L'appareil photo (objectif 50 mm) a été réglé sur des temps d'ouverture 0,125 et 0,25 secondes, avec un diaphragme $\phi = 4$ (pellicule 400 ASA).

La fréquence de balayage du rayon laser a été réglée sur 50 Hz environ, soit une période de 20 ms (5 à 12 balayages complets par photo).

Dans le réservoir initial, les particules ont été mises en suspension dans l'eau salée quelques minutes avant l'injection avec une très faible concentration (quelques dizaines de grammes par litre d'eau salée). Dans certains cas, des particules ont été disséminées dans le bassin afin de visualiser les mouvements du fluide ambiant au passage du fluide lourd.

Les prises de vues ont été effectuées tantôt l'appareil immobile (écoulement en repère fixe), tantôt l'appareil suivant approximativement la vitesse du front de l'écoulement (écoulement en repère mobile).

Le chariot latéral n'ayant pu être asservi, il a été difficile de suivre parfaitement les écoulements afin de visualiser les tourbillons internes (Figure 4).

Sur les figures 5 à 9, on distingue des traits continus et des traits en pointillé. Les traits continus correspondent à des zones où les vitesses sont inférieures à celles des zones de traits en pointillé. Un traitement quantitatif de l'image nécessiterait un réglage de la fréquence de balayage en fonction des vitesses des écoulements (diminution de la fréquence sur les clichés obtenus dans nos expériences).

Conclusion

Ces premiers essais ont permis la mise au point délicate de la visualisation laser dans le cas d'écoulements instantanés : détermination de la fréquence de balayage du rayon laser, amplitude du balayage, choix des particules en suspension, des sensibilités des pellicules photos, des caractéristiques de prise de vue (diaphragme, temps d'ouverture, déplacement de l'appareil).

Des essais plus systématiques, effectués en déplaçant l'appareil à la vitesse du front des écoulements devraient permettre d'analyser leur dynamique interne.

Cette méthode de visualisation devrait également donner des résultats intéressants lorsque les écoulements sont perturbés : rupture de pente, effet d'étalement à la sortie d'un canal, présence d'obstacles, rugosité importante du sol.

Il est également prévu de l'utiliser dans la modélisation physique du snow-drift (transport de neige par le vent) en veine liquide (étude en cours).

Écoulements granulaires et avalanches de neige pulvérulente

On peut distinguer trois grands types d'avalanches :

- l'avalanche de neige en plaque;
- l'avalanche de neige humide;
- l'avalanche de neige pulvérulente (froide et sèche) ou avalanche pulvérulente.

La présente étude a eu pour but de mieux cerner la dynamique de ce dernier type d'avalanche.

L'avalanche pulvérulente peut prendre en cours d'écoulement deux aspects très différents :

- l'avalanche dite « dense » (densité de l'ordre de 100 kg/m^3) dont l'écoulement le long de la pente est influencé par le relief. La vitesse peut atteindre quelques dizaines de mètres par seconde;
- l'avalanche dite « poudreuse » (densité de l'ordre de quelques kg/m^3) s'écoulant sous forme d'un aérosol peu influencé par le relief, à grande vitesse : $50 - 100 \text{ m/s}$.

Dans certaines conditions (trajet suffisamment long, quantité de neige suffisante) l'avalanche pulvérulente lourde donne naissance à une avalanche poudreuse qui peut se propager sur une grande distance sans perdre de sa puissance destructive.

Depuis plusieurs années s'est développée la simulation physique en modèle noyé des avalanches de poudreuse assimilées à des courants de turbidité (écoulement le long d'une pente d'un fluide lourd turbulent dans un fluide ambiant au repos). Si ces recherches ont permis une meilleure connaissance de la dynamique de ce type d'avalanche, en revanche elles n'ont pas permis de résoudre le problème complexe de sa formation à partir d'une masse de neige immobile. En particulier le régime de l'avalanche dense ne peut être modélisé de manière satisfaisante en modèle noyé. L'avalanche dense peut être considérée comme un écoulement granulaire sans cohésion, c'est-à-dire mettant en jeu des particules solides dispersées dans un fluide interstitiel, la concentration de la phase solide étant supérieure à 10 %.

Afin d'étudier la dynamique des écoulements granulaires, en particulier les mécanismes de mise en suspension des particules (passage du régime de l'avalanche dense à celui de l'avalanche poudreuse) un canal inclinable de 10 m de long a été construit à l'extérieur. Les essais ont

été principalement effectués en injectant depuis un réservoir supérieur des microbilles de verre calibrées.

A partir d'une trentaine d'essais, nous avons pu observer un certain nombre de phénomènes extrapolables aux avalanches pulvérulentes. Des résultats quantitatifs ont été obtenus concernant la dynamique des écoulements granulaires.

Quelques aspects de la mécanique des écoulements granulaires

Les exemples d'écoulements granulaires sont nombreux : écoulement de sable sec (l'application la plus ancienne et la plus connue étant probablement le sablier), transport pneumatique en conduite de poudres ou de farines...

Malgré le grand nombre de phénomènes qui s'y rattachent, la mécanique des écoulements granulaires est encore mal connue et n'a donné lieu qu'à très peu d'études fondamentales. Les travaux de Bagnold (1954-1966) ont apporté une contribution majeure dans ce domaine.

Bagnold étudie le comportement d'une dispersion de grains dans un fluide ambiant. Lorsque leur concentration volumique est inférieure à 9 %, il n'y a pas d'influence mutuelle entre les grains (cas d'une suspension type aérosol de l'avalanche poudreuse). Les très fortes concentrations correspondant aux cas de grains en contact les uns avec les autres (pentes de sable).

A des concentrations intermédiaires, la distance entre grains étant inférieure à leur diamètre, il distingue, pour une dispersion soumise à un cisaillement deux types de comportement selon que les effets dus à l'inertie des grains l'emportent ou non sur ceux de la viscosité du fluide interstitiel (domaine « inertielle » ou domaine « visqueux »).

Il introduit la notion de pression dispersive P qui n'est autre qu'une contrainte due à la présence des grains et qui s'exerce normalement au plan de cisaillement. Elle est proportionnelle à la contrainte de cisaillement T .

Dans le domaine « inertiel »

$$T \text{ et } P \propto \rho_s (\lambda D)^2 \left(\frac{dU}{dy} \right)^2 \quad (1)$$

et dans le domaine « visqueux »

$$T \text{ et } P \propto \lambda^{3/2} \eta \frac{dU}{dy} \quad (2)$$

- α : symbole de « proportionnel à »
 ρ_s : densité des grains
 λ : concentration linéaire des grains (rapport de leur diamètre à la distance qui les sépare)
 D : diamètre des grains
 dU/dy : intensité du cisaillement
 η : viscosité du fluide

Lorsque le fluide interstitiel est turbulent, la présence de grains a un effet inhibiteur sur la turbulence. Une croissance de la concentration provoque une diminution de l'intensité turbulente et par conséquent de la résistance au cisaillement du fluide. Bagnold applique ces résultats à divers écoulements de sable sec (dunes ou talus) et à certains phénomènes inexplicables qui s'y rattachent.

L'avalanche de neige pulvérulente

L'avalanche dense

Une avalanche dense est un écoulement turbulent d'une dispersion de fines particules de neige dans un fluide interstitiel, l'air.

La densité de la dispersion est : $\rho = C\rho_p$

C : concentration volumique de la phase solide
 ρ_p : densité des particules

En prenant $\rho_p = 0,9$ (densité de la glace) et $\rho = 0,1$ à $0,3$, C est de l'ordre de 10 à 30 % (λ de 1 à 3).

A ces faibles concentrations la dispersion se comporte comme un fluide avec un coefficient de frottement interne nul.

L'écoulement ne peut cependant être assimilé à celui d'un fluide Newtonien dans la mesure où il est soumis à une pression dispersive.

Il est à noter que les modèles numériques assimilent l'avalanche dense à un écoulement à surface libre en négligeant cet aspect granulaire.

On peut considérer qu'en raison de sa vitesse élevée (fort cisaillement) et de la faible viscosité de l'air, l'écoulement de l'avalanche se situe dans le domaine « inertiel ». La pression dispersive qui apparaît entraîne une décroissance de la concentration λ (expansion verticale de la couche en mouvement). Le frottement au sol étant fonction de la concentration en particules au niveau du sol, celui-ci a tendance à diminuer et par voie de conséquence la vitesse a tendance à augmenter. D'autre par la décroissance de λ contribue à augmenter l'intensité turbulente au sein de l'avalanche.

La formation de l'avalanche poudreuse

Les conditions d'apparition de l'avalanche poudreuse à partir de l'écoulement de neige dense sont encore mal connues.

Le phénomène est assez comparable à la formation des courants de turbidité à partir des « débris flow » sous marins, étudiés par de nombreux sédimentologues (Hampton 1972) bien que les rapports de densité entre particules solides et fluide porteur soient radicalement différents. En se référant à ces travaux, on peut considérer qu'il existe différents mécanismes de formation de l'aérosol de poudreuse.

A l'interface avalanche dense-air ambiant il y a diffusion des particules de neige dans la couche limite turbulente qui se développe au-dessus de l'avalanche. D'après Mellor (1978), cette diffusion se produit dès que l'avalanche atteint 7 m/s. Elle est favorisée par la turbulence au sein de l'avalanche. Il y a formation d'un nuage poudreux dont la masse s'accroît au cours de l'écoulement. Si le trajet est suffisamment long, cet aérosol peut acquérir une vitesse supérieure à celle de l'avalanche dense et s'écouler indépendamment (avalanche poudreuse).

Il a en effet été montré que la vitesse d'un tel aérosol était proportionnelle à $\sqrt{\Delta m}$ (Δm : excès de masse de l'aérosol par rapport au fluide ambiant — Béghin, Hopfinger et Britter 1981 —).

La formation de l'avalanche poudreuse peut être bien plus soudaine.

Une perturbation dans l'écoulement au sol (cassure de pente, obstacle...) peut provoquer un phénomène analogue à un ressaut hydraulique, dans la mesure où le nombre de Froude lié à l'écoulement (rapport des forces d'inertie aux forces de pesanteur) et bien supérieur à l'unité (écoulement surcritique). Il y a mise en suspension brutale d'une grande partie de la neige en mouvement.

Sur le front de l'avalanche dense, outre l'entraînement de la neige au sol, il peut également se produire un fort entraînement d'air selon un mécanisme décrit par Longuet-Higgins et Turner (1974) pour les vagues déferlantes. Cet entraînement d'air s'ajoute à l'effet de la pression dispersive sur la décroissance de la densité de l'avalanche dense et favorise la formation de l'avalanche de poudreuse.

Étude expérimentale des écoulements granulaires

Les installations expérimentales (Fig. 10 à 13)

Le canal d'écoulement (longueur 10 m, largeur 0,18 m, hauteur 0,25 m) est à bords lisses. Les six premiers mètres sont en PVC, les quatre derniers en plexiglas afin de pouvoir visualiser les écoulements par côté. Les plaques de plexiglas sont démontables. Le fond est constitué de plaques de glasal (revêtement type céramique) avec repères de distance (10 cm en 10 cm). Dans certains essais, il a été recouvert d'une bande de papier de verre afin

Figure 10 — Les installations.

Figure 11 — Canal en cours de levage.

Figure 12 — Réservoir initial et système de guidage.

Figure 13 — Réservoir initial d'injection.

d'augmenter de manière significative la rugosité du sol. A son extrémité supérieure, le canal est prolongé par un réservoir d'injection en PVC dans lequel sont versés les matériaux avant essais. L'injection s'effectue par une ouverture munie d'une vanne que l'on peut commander à distance par un câble sous gaine. La hauteur d'injection est réglable avec une grande précision (cales de butée).

L'ensemble canal-réservoir est fixé par l'intermédiaire de deux cornières en aluminium sur une poutre rigide en bois « lamelle-collé ». L'extrémité inférieure de la poutre roule horizontalement sur le sol. L'extrémité supérieure est guidée par un profil en U de 6 m de haut, fixé sur le côté du bâtiment.

L'inclinaison de la poutre s'effectue à l'aide d'un treuil manuel par l'intermédiaire d'un câble ($\varnothing$ 5 mm) passant sur une poulie fixée sous le toit du bâtiment. (Inclinaison maximum : 37°).

Les méthodes de mesure

A ce stade initial de l'étude les écoulements granulaires n'ont été suivis qu'avec des appareils photos Nikon F 3 à déclenchement automatique, préréglé avec un intervallo-mètre. (Fréquence de prises de vue allant jusqu'à 5 images/s).

Quelques séquences filmées ont également été réalisées. L'un des appareils, fixé sur une échelle métallique, permet de suivre la totalité de l'écoulement en vue de dessus. Le 2^e appareil donne une vue latérale de l'écoulement sur les quatre derniers mètres. Les vitesses sont déterminées à partir des photos successives (distance parcourue pendant l'intervalle de temps affiché sur l'intervallo-mètre).

Dans un premier temps nous ne nous sommes intéressés qu'à la vitesse du front U_f (Fig. 14).

Les matériaux d'essais

Nous avons à notre disposition plusieurs matériaux de densité et granulométrie différentes

- les sciures de bois
- les particules de plastique (PVC méthacrylate)
- les argiles
- les micro-billes de verre

Ces dernières, de forme très sphérique, relativement bien calibrées, semblent les plus intéressantes pour des études quantitatives plus poussées.

Les particules argileuses, théoriquement plus facile à mettre en suspension dans l'air, sont très sensibles à l'humidité ambiante et s'amalgament en formant un matériau à cohésion non nulle.

De manière générale, le fait de travailler à l'extérieur entraîne des difficultés quant à l'obtention d'écoulements granulaires sans cohésion, tout au moins pour les très faibles granulométries ($< 100\mu$).

Déroulement des essais

La poutre étant posée au sol, le réservoir d'injection est rempli avec les matériaux choisis (5 à 10 kg).

Le canal d'écoulement est soigneusement balayé afin d'obtenir sur les photos un fond très net et une bonne estimation de la position du front de l'écoulement. La poutre est inclinée sans à coups jusqu'à la pente choisie. A l'ouverture brusque de la vanne, l'intervallomètre est déclenché. Les vitesses d'écoulement variant dans des proportions considérables d'un écoulement à l'autre (de 1

à 10) nous avons utilisé des fréquences de prises de vue s'étalant de 3 par seconde à 1 par 2 secondes.

Premiers résultats expérimentaux : interprétation

Une trentaine d'essais ont été réalisés sur des pentes variant de 20° à 37° avec trois hauteurs d'injection initiale : $h_0 = 15, 30$ et 55 mm.

Le tableau I résume les caractéristiques des essais les plus significatifs effectués avec des billes de verre.

Écoulements granulaires

Nos résultats montrent une grande variation des vitesses en fonction de la pente et ce pour des pentes nettement supérieures à l'angle de frottement dynamique sur le fond du canal ($\approx 18^\circ$ sur fond lisse) (Fig. 15). Ainsi, entre 30 et

Figure 15 — Vitesse du front des écoulements en fonction de la pente. Evolution du rapport : $U_f/(\sin \alpha)$.

Figure 14 — Évolution du front en cours d'écoulement (appareil photo supérieur).

35°, la vitesse est pratiquement doublée. Or, si l'on s'en réfère à la formule simplifiée (type formule de Chézy) décrivant l'écoulement de l'avalanche dense (Mellor 1968) la vitesse devrait être pratiquement indépendante de la pente (proportionnelle à $\sin \alpha^{1/2}$).

La figure 15 montre que le rapport $U_f/(\sin \alpha)^{1/2}$ croît fortement avec la pente quelles que soient les granulométries des matériaux. Ce résultat est conforme à l'analyse de Bagnold (voir I). L'effet de la pression dispersive (diminution de la concentration linéaire λ) est de diminuer le frottement turbulent au niveau du fond du canal et s'ajoute à celui de la composante suivant la pente des forces de pesanteur.

Le tableau I montre d'autre part qu'à pente et hauteur h_0 égales, la vitesse varie fortement avec la granulométrie des matériaux :

à 30° granulo 0-50 μ	$U_f \approx 190$ cm/s
granulo 0-50/70-110/140-270	$U_f \approx 300$ cm/s
à 33° granulo 0-50	$U_f \approx 240$ cm/s
granulo 0-50/70-110/140-270	$U_f \approx 430$ cm/s
à 37° granulo 0-50	$U_f \approx 350$ cm/s
granulo 140-270	$U_f \approx 560$ cm/s

Ce résultat est en accord avec la formule (1) : la pression dispersive étant fonction de D^2 , une augmentation de la granulométrie moyenne se traduit par un

accroissement de P et par conséquent par une diminution du frottement au sol.

Les essais réalisés sur un fond rugueux (taille caractéristique des aspérités 100 μ) mettent en évidence des vitesses nettement inférieures à celles des écoulements sur fond lisse (tableau I).

Mise en suspension des écoulements : difficultés de la simulation du phénomène réel

Dans la simulation sur modèle physique de l'avalanche dense en tant qu'écoulement à surface libre l'un des paramètres à respecter est le nombre de Froude $U/(gH)^{1/2}$ U et H vitesse et dimension caractéristiques de l'écoulement.

Si E_L , E_U et E_T sont les échelles de longueurs, de vitesses et de temps entre le modèle et la réalité $E_U = (E_L)^{1/2}$ et $E_T = (E_L)^{1/2}$

Par conséquent les écoulements en modèle sont beaucoup plus brefs que dans la réalité.

Or l'excès de masse Δm (par rapport à l'air), de l'aérosol qui se forme au-dessus de l'avalanche dense par mise en suspension progressive des particules de neige dépend a priori du rapport U_c/U (U_c et U vitesse de chute dans l'air des particules et vitesse de l'écoulement), de la dimension et de la durée de l'écoulement. On conçoit qu'en modèle, il est alors difficile d'observer la formation d'un aérosol de masse suffisante pour pouvoir se propager indépendamment de l'écoulement au sol.

Tableau I : Caractéristiques des principaux essais

Pente α	Granulo matériaux en microns	Hauteur initiale h_0 (mm)	Rugosité du fond	Surépaisseur fixée sur le fond (distance du lieu d'injection) (cm)	U_f max en cm/s	U_f moyenne (partie inf. du canal)	Vitesse moyenne après mise en suspension
20°	0-50/70-110/140-270 (mélange)	30	lisse	-	40	40	-
21°	140-270	15	lisse	-	27	25	-
23°	140-270	15	lisse	-	60	50	-
25°	140-270	15	lisse	-	190	170	-
25°	140-270	15	lisse	-	155	150	-
25°	140-270	15	lisse	-	210	200	-
25°	0-50/70-110/140-270	30	lisse	-	200	200	-
30°	0-50/70-110/140-270	30	lisse	-	340	300	-
30°	0-50	30	lisse	-	200	190	-
30°	0-50	30	lisse	-	170	150	-
30°	0-50	30	lisse	à 820	185	150	140
30°	0-50	30	lisse	à 410 et 820	150	120	110
30°	0-50	30	lisse	à 620	160	150	120
32°	0-50	30	lisse	à 620	240	230	200
33°	0-50	30	lisse	-	250	240	-
33°	0-50/70-110/140-270	30	lisse	-	430	430	-
35°	0-50	30	lisse	à 620 et 820	280	250	200
35°	0-50	30	lisse	à 620	310	270	260
35°	argile + 100-200	30	lisse	-	225	200	-
37°	0-50	30	100	-	175	150	-
37°	0-50	55	100	-	275	250	-
37°	0-50	55	lisse	-	350	350	-
37°	140-270	55	lisse	-	600	560	-

Dans les essais réalisés avec des billes de verre de $0-50\ \mu$ en écoulement sur fond lisse, il n'a pas été observé de mise en suspension significative des particules.

L'essai effectué en utilisant un mélange d'argile (Kaolin) et de billes de verre $100-200\ \mu$, n'a pas donné un meilleur résultat dans la mesure où les particules d'argile ont tendance à s'agglomérer à l'humidité de l'air ambiant (conditions d'expériences).

Plusieurs essais ont été réalisés en fixant dans le fond du canal, sur la largeur totale, 1 à 2 obstructions de faible épaisseur (plaque de PVC de 2 mm d'épaisseur) à des distances variables du lieu d'injection (*tableau I*).

Les photos obtenues (*Fig. 16*) montrent une mise en suspension spectaculaire d'une grande partie des matériaux en écoulement (billes $0-50\ \mu$). La hauteur de l'écoulement croît fortement, la concentration des particules décroît (mise en suspension) tandis que la vitesse du front ne décroît pas de manière significative.

Le phénomène est assez similaire au ressaut granulaire étudié par Savage (1979) avec des écoulements de billes de polystyrène. Dans les expériences de Savage, cependant, le nombre de Froude, de l'écoulement amont est de l'ordre de quelques unités (de l'ordre de 10 dans nos expériences). Il obtient au niveau du ressaut, une forte augmentation de la hauteur de l'écoulement, une augmentation de la concentration solide et une diminution de la vitesse. Il n'observe pratiquement pas de mise en suspension des particules dans l'air.

Dans nos essais, une grande partie des particules mises en suspension ont tendance à retomber puis à s'écouler sur le fond du canal. On n'observe pas, à proprement parler, la propagation d'un aérosol bien développé type avalanche de poudreuse.

La quantité de particules mises en suspension étant relativement faible, l'aérosol ne peut acquérir une vitesse suffisante par rapport à la vitesse de chute des particules ($5\ \text{cm/s}$ pour des granulométries de l'ordre de $25\ \mu$).

Pour une avalanche poudreuse, le rapport des vitesses est de l'ordre de 10^{-2} . En utilisant des particules de très faibles diamètres (type argile ou farine) on se heurte à des problèmes de cohésion entre particules dont la mise en suspension devient difficile.

Conclusion

Malgré les difficultés à obtenir la mise en suspension des particules en écoulement, ces premiers essais ont donné quelques résultats intéressants sur la dynamique des écoulements granulaires et ont permis de déterminer les modifications à apporter à l'installation.

En particulier il semble nécessaire de pouvoir travailler sur des pentes supérieures (jusqu'à $45-50^\circ$ par exemple) et d'utiliser des matériaux secs de très faibles granulométries (pour la mise en suspension). Pour la propagation d'écoulements type aérosols, il faudrait nettement augmenter la hauteur des bords du canal et prolonger celui-ci par un canal à pente faible.

Des mesures quantitatives plus nombreuses et plus précises seraient nécessaires : densité, hauteur, vitesse et

Figure 16 — Mise en suspension du matériau au niveau d'une surépaisseur du fond (billes $0-50\ \mu$).

gradient de vitesse des écoulements granulaires en fonction de la granulométrie, de la pente, de la rugosité du sol et de l'injection initiale.

On se heurte cependant à l'impossibilité d'effectuer des mesures au sein même des écoulements.

Le phénomène de reprise de neige au sol par l'avalanche devrait être étudié. Il y a cependant une grande différence de comportement entre le matériau neige et le matériau type sable. Les liaisons inter-granulaires qui

s'établissent dans la couche de neige fraîche au sol permettent à celle-ci de tenir sur des pentes nettement supérieures à l'angle de frottement interne de la neige destabilisée (destruction de la cohésion intergranulaire au passage de l'avalanche par exemple). Pour un matériau type sable où les grains n'évoluent pas, il y a mise en mouvement de la couche dès que l'on atteint l'angle de frottement interne du matériau ($\theta \approx 23^\circ$ pour les billes de verre).

Références bibliographiques

BAGNOLD, 1954. — *Proceedings of the Royal Society of London*. — Vol 225.

BAGNOLD, 1966. — *Proceedings Royal Soc. London A*. 295.

BEGHIN, HOPFINGER et BRITTER, 1981/*J. Fluid Mech.* 107.

HAMPTON M.A., 1972. — *J. of Sedimentary Petrology*. — Vol 42, n° 4.

LONGUET-HIGGINS et TURNER, 1974. — *J. Fluid Mech.* 63.

MELLOR M., 1978. — *Rockslides and avalanches*. — Tome I (Ed. Voight).

SAVAGE S.B., 1979. — *J. Fluid Mech.* 92.

Discussion

Président : M. L. LLIBOUTRY

M. le Président remercie M. BEGHIN et propose d'utiliser un écoulement sur une bande mobile de façon à stabiliser le front de l'avalanche. Cela a été fait répond M. BEGHIN à la Sogreah et au Cemagref sans donner de résultat, la difficulté étant de stabiliser le front. En fait ce qu'on recherche c'est une visualisation des phénomènes à l'intérieur de l'écoulement, ce dont les calculs ne rendent pas compte.

Quel est le diamètre des billes utilisées demande M. MEGNIEN ? Les plus fines sont des micro-billes d'un diamètre moyen de 25 microns.

M. le Président demande si des billes sont ce qu'il y a de plus adapté pour imiter la neige, qui lorsqu'elle est fluide est plus anguleuse.

M. BEGHIN souligne la difficulté qu'il y a déjà à comprendre les mécanismes d'écoulement avec des particules simples.

M. ADMIRAT se pose la question de l'existence de phénomènes statiques changeant la granulométrie et par là les vitesses d'écoulement.

C'est possible répond M. BEGHIN, mais cela ne peut pas expliquer les différences de vitesses observées.

M. le Président demande si l'on n'a pas fait des études analogues sur les grains.

M. BEGHIN répond que ces études sont en développement aux Etats-Unis, mais que les modèles ne conduisent pas à des résultats fondamentaux sur le plan physique.

M. MARBOUTY constate qu'en effet malgré tous les modèles mathématiques proposés pour la neige on ne sait travailler actuellement qu'avec de petites sphères. De petites étoiles seraient préférables, mais personne ne sait le faire.

M. GUILLOT demande si l'on peut espérer reconstituer, avec cette simulation, l'onde de choc observée à l'avant de l'avalanche de poudreuse.

M. BEGHIN pense que c'est difficile du fait de la simulation utilisée et de sa longueur. Il fait état des essais effectués tant aux Etats-Unis qu'à la Sogreah et qui ont été abandonnés.

M. le Président remercie M. BEGHIN en souhaitant voir les résultats du développement de ces études l'an prochain.