

**Pôle Grenoblois d'Etudes et de Recherche pour la Prévention des  
Risques Naturels**



**Etude expérimentale  
des écoulements d'avalanches de neige dense**

Mesures et interprétations des profils de vitesse en  
écoulements quasi permanents et pleinement  
développés

**Rapport scientifique**

**Mohamed Naaim et Alexi Bouchet  
UR ETNA – Grenoble**

## Résumé des travaux

L'objectif de ce projet est de déterminer expérimentalement les lois de comportement de la neige et les lois d'écoulement des avalanches denses. Afin d'étudier les écoulements à surface libre de neige sur fond rugueux un dispositif expérimental de type laboratoire a été installée au Col du Lac Blanc situé à 2800 m d'altitude dans les Alpes françaises, près de la station de sports d'hiver de l'Alpe d'Huez. Elle se compose d'un canal de 20 centimètres de largeur, 10 mètres de longueur et 30 centimètres de hauteur, alimenté en neige par un distributeur motorisé. La pente du canal et le débit d'entrée du distributeur peuvent être réglés. Les sondes installées dans le canal fournissent des mesures du profil de vitesse, de la taille d'écoulement et des efforts normal et de cisaillement au fond de l'écoulement.

Des profils de vitesse pour différentes pentes ont été obtenus et sont présentés dans ce rapport. Les résultats indiquent la présence d'une couche fortement active (cisailée) au fond de l'écoulement. Cette couche est principalement responsable de la vitesse de l'avalanche, alors que la couche supérieure a un gradient de vitesse beaucoup plus petit. Une première interprétation des résultats est fournie dans ce rapport.

## 1 INTRODUCTION

Beaucoup de modèles ont été proposés pour décrire des avalanches de neige mais très peu de données sont disponibles pour calibrer les paramètres de ces modèles. C'est par conséquent un grand défi pour obtenir ces paramètres au moyen de mesures sur des écoulements de neige.

La question des profils de vitesse dans des écoulements de neige a été déjà étudiée par [Nishimura89] dans un système de mini-avalanche et par [Dent98] dans une vraie avalanche. Ils ont tous observé une couche mince et fortement cisailée au fond avec une grande couche supérieure dont le gradient de vitesse était beaucoup plus petit (même rigide dans le cas des mesures de Nishimura89). À notre connaissance, aucune étude systématique des profils de vitesse pour différentes pentes et hauteur d'écoulements n'a été réalisées. Pour cette raison, nous avons construit un système pour générer des écoulements de neige à divers pentes et divers débits. Notre but était de produire des écoulements en état d'équilibre. Par conséquent, le canal d'écoulement devait être assez long. Il nous a permis de mesurer des profils de vitesse en régime quasi-permanent et quasi-établi pour des pentes dans la gamme de  $31^\circ$  à  $39^\circ$ .

Les valeurs typiques de la taille et des vitesses des écoulements que nous avons observés sont de l'ordre de 8 à 10 centimètres pour la hauteur et de l'ordre de  $4 \text{ m.s}^{-1}$ . Le nombre approximatif de Froude est ainsi de l'ordre de 4,5 ce qui est compatible avec les nombres de Froude des avalanches réelles. Mais ces écoulements sont d'un ordre de grandeur plus petit que les avalanches réelles et l'extrapolation des résultats à une échelle demande beaucoup de précaution et en particulier la comparaison avec des mesures obtenues sur des avalanches réelles.

## 2 DESCRIPTION DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL

### 2.1 Le dispositif

L'installation expérimentale que nous avons construit et le procédé expérimental ont été amplement décrits dans un article à paraître dans *Annals of Glaciology* [Bouchet & Naaim 2003]. La figure 1 montre l'installation. Elle se compose d'un canal incliné avec une pente réglable. Le canal est alimenté par un distributeur motorisé (Trémie et vis d'Archimède). Le canal est maintenu par une poutre dont l'inclinaison est réglable. Par conséquent, la pente du canal peut être variée de  $27^\circ$  à  $41^\circ$  par pas de  $2^\circ$ . Comme les paragraphes suivants le montreront, ce dispositif a permis d'obtenir des écoulements quasi permanent et quasi-établi sur cette gamme de pente.

Le système d'alimentation se compose d'une trémie de stockage équipée d'une vis d'Archimède pour entraîner la neige de la trémie vers le canal avec un débit constant. Le pas de la vis est croissant afin d'éviter le tassement de la neige pendant son transport. Elle est entraînée par un moteur diesel couplé à un moteur hydraulique. Ce système nous permet de fixer le débit à la valeur désirée entre 0 et  $500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ . Puisque la capacité de stockage de la trémie est de  $5 \text{ m}^3$ , l'écoulement peut durer d'une à plusieurs minutes. Cependant, pour éviter un tassement trop grand de la neige, la trémie est remplie seulement à un tiers de sa capacité. Les écoulements durent alors environ 30 secondes, ce qui est largement suffisant pour atteindre un régime pleinement développé.

Puisque le canal est plus étroit que la vis, un entonnoir fait le lien entre l'extrémité de la vis et le canal. Le fond du canal a été couvert de papier de verre pour créer un fond rugueux de même rugosité que la neige. Le canal a un double fond où les systèmes électroniques nécessaires pour la mesure sont installés.

Des la mise en route de la vis, l'écoulement est lancé et il atteint son état d'équilibre rapidement en moins de deux secondes.

### 2.2 Instrumentation

Les sondes installées sur le canal (schéma sur Figure 2) fournissent des mesures de:

- La force normale  $\sigma$  et la force de cisaillement  $\tau$  au fond du canal à 6 mètres à l'aval du début du canal. Cette mesure est obtenue grâce à des sondes piézoélectriques;
- L'épaisseur de l'écoulement à trois endroits différents:  $h_1$  à 4,5 m en aval du début du canal,  $h_2$  à 6 m (au-dessus des mesures d'efforts) et  $h_3$  à 6,5 m, à l'aide de sondes optiques de distance situées au-dessus de l'écoulement ;
- Les profils de vitesse à trois endroits différents: 6 m, sur la paroi latérale (profil P1) au-dessous de la mesure de  $h_2$ , 6,5 m en aval, sur la paroi latérale (profil P<sub>2</sub>) et au milieu du canal (profil P<sub>3</sub>).

Pour la mesure de vitesse, nous avons employé la méthode développée par [Dent98]. Elle est basée sur la corrélation de deux signaux obtenus par deux sondes identiques qui sont déplacées à 1 cm l'une de l'autre dans le sens de l'écoulement. Fondamentalement, chaque sonde de vitesse est faite de deux sondes identiques de réflectivité qui se composent d'une

IR-led et d'un phototransistor comme représenté dans la figure 3. Ces dispositifs sont très sensibles à la quantité de lumière recueillie par le phototransistor. Puisque cette quantité de lumière dépend de l'état de granularité de la surface réfléchissante, le signal obtenu est caractéristique du paquet de neige qui a réfléchi la lumière de la LED au phototransistor.

Quand la direction de vitesse est connue, deux dispositifs placés à une distance  $d$  dans la direction de la vitesse, donnent des signaux identiques avec un décalage de temps  $\Delta t = \frac{d}{v}$  où  $v$  est la vitesse de l'écoulement.

Pour améliorer et optimiser cette méthode, nous avons utilisé trois dispositifs au lieu de deux. Les premiers et deuxièmes dispositifs sont séparés par une distance dans le sens d'écoulement de 3 centimètres tandis que le deuxième et le troisième sont séparés de 2 centimètres. Chaque mesure de vitesse est ainsi effectuée trois fois avec des distances entre deux dispositifs de 2, 3 et 5 centimètres.

Le profil de vitesse est alors déterminé en utilisant 9 de ces sondes placées dans une ligne orthogonale à l'écoulement à partir du fond avec un espacement d'un centimètre. Les capteurs sont séparés de l'écoulement par une fenêtre de verre épaisse de 3 millimètres pour améliorer leurs précisions.

Tous les résultats présentés ci-dessous ont été obtenus avec des écoulements de grains fins de neige.

### 2.3 Mesure de hauteur

Des variations typiques des hauteurs d'écoulements  $h_2$  et  $h_3$  pendant l'écoulement sont présentées sur les graphiques de la figure 4. De ce graphique, deux observations peuvent être faites.

- La hauteur a des variations périodiques pendant l'écoulement. Nous avons observé que les maxima de ces variations sont transportés par l'écoulement. Deux interprétations sont possibles : soit ces ondes sont générées par le système d'alimentation soit elles sont intrinsèques à l'écoulement dont le nombre de Froude est élevé ; condition nécessaire à l'apparition d'instabilités de type « rolls waves ».
- Les variations de  $h_2$  suivent ceux de  $h_3$ . En première approximation, il est possible d'écrire que:  $h_2(t) = h_3(t - dt)$  où  $dt$  est un retard égale à approximativement à la moitié d'une seconde.

Vu le premier point, on ne peut pas rigoureusement parler de régime d'équilibre. Par contre si  $T$  est la période des oscillations, la moyenne de la hauteur sur cette période est indépendante du temps. Un tel écoulement peut être décrit comme quasi-permanent. On n'observe aucune augmentation ou diminution régulière de la hauteur pendant la phase stationnaire de l'écoulement.

Comme deuxième constatation, la moyenne sur la période  $T$  de la hauteur  $h_2$  est quasiment égale à la moyenne de  $h_3$  sur la même période. Ceci implique que l'écoulement est établi en moyenne.

Ces observations montrent bien que nous sommes en présence d'un écoulement quasi-permanent et quasi-établi. Nous allons donc moyenner sur la durée de l'écoulement les hauteurs et les vitesses qui seront considérées comme représentatifs d'un régime quasi-établi ayant atteint son état d'équilibre.

## 2.4 Profils de vitesses

Dans cette section, seules les mesures obtenues à partir du profil P3 seront présentées et analysées. Le principe de mesure et la méthode de traitement construite sur des critères sévères rejettent une partie des mesures de vitesses. Le traitement pour aller des signaux brutes à la vitesse, utilise la corrélation. Nous avons imposé des critères contraignants qui ne retiennent que les mesures crédibles. Nous allons donc étudier les profils de vitesse obtenus en faisant la moyenne des mesures sur l'ensemble de la durée de l'écoulement pour chaque écoulement.

Tableau 1 : Données expérimentales

Angle de pente	Hauteur d'écoulement	Masse volumique	Vitesse de glissement	Taux de cisaillement
31	8.5	220	3.12	10.8
31	7.3	220	3.03	13.55
33	7.4	360	3.08	15.3
33	8.35	360	3.2	12.5
35	8.25	220	4.28	11.1
35	7.6	220	3.61	10.6
37	8.0	250	4.24	13.1
37	9.55	250	3.99	9.24
39	6.25	270	4.88	14.4
39	6.05	270	4.94	13.5
39	6.8	270	4.95	14.4

Deux exemples des profils obtenus sont représentés sur la figure 4-a,b. Le profil (a) correspond à l'écoulement obtenu avec un angle de pente de 31°, d'une masse volumique de la neige de 220 kg.m<sup>-3</sup> et d'une température autour de -25°C (pour la neige et pour l'air). Le profil (b) a été obtenu avec un angle de pente de 39°, d'une masse volumique de neige de 270 kg.m<sup>-3</sup> et d'une température autour de -20°C (pour la neige et pour l'air). Sur ces profils, les barres horizontales d'erreur sont l'écart type de la distribution de vitesse pour chaque sonde pendant la totalité de l'écoulement. Sur les deux profils, on peut noter que la vitesse de la sonde inférieure est différente de zéro. Ceci peut signifier soit :

- qu'il y a une couche mince fortement cisailée d'un centimètre d'épaisseur et dont le taux de cisaillement serait au moins supérieur à 500s<sup>-1</sup>
- ou que la neige glisse sur le fond.

Puisqu'il est impossible d'observer des variations sur des épaisseurs inférieures à un centimètre avec nos sondes, nous avons choisi de décrire cette couche par une vitesse de

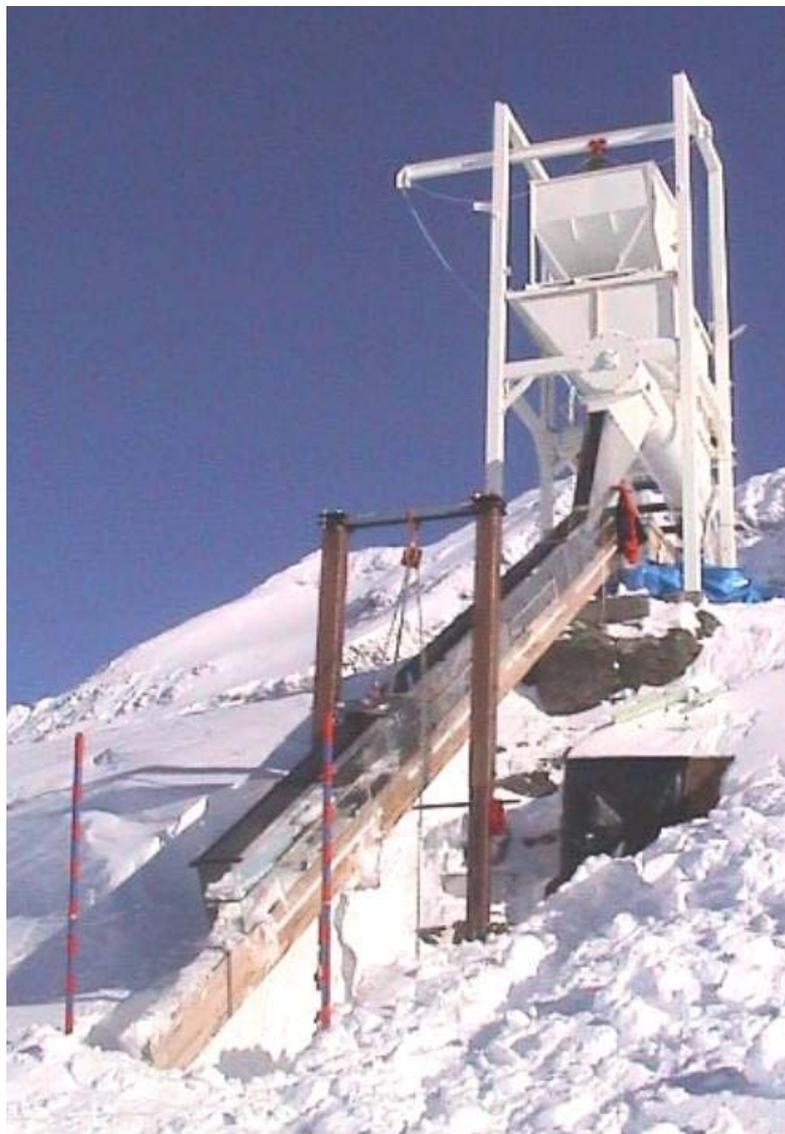
glissement sur le fond. Au-dessus de cette zone, la vitesse augmente légèrement mais régulièrement avec un gradient presque uniforme.

Puisqu'on a observé ces deux caractéristiques pour chaque écoulement, nous avons choisi un ajustement linéaire pour chaque profil avec la fonction:

$$v(z) = v_s + \dot{\gamma}z$$

Chaque profil est ainsi décrit par deux paramètres:

- une vitesse de glissement  $v_s$
- un taux de cisaillement uniforme  $\dot{\gamma}$



**Figure 1** : Dispositif expérimental d'étude des avalanches dense

Les caractéristiques (pente, hauteur moyennée sur la durée de l'écoulement et la masse volumique de la neige) des écoulements et des résultats obtenus sont présentés dans le tableau 1.

Les différents taux de cisaillement obtenus sont très semblables. En outre, comme vu sur la figure 7 on n'observe aucune dépendance significative du taux de cisaillement moyen en fonction de la pente ou de la masse volumique. Pour ce qui concerne la vitesse de glissement elle augmente régulièrement (linéairement) avec la pente comme le montre la figure 8.

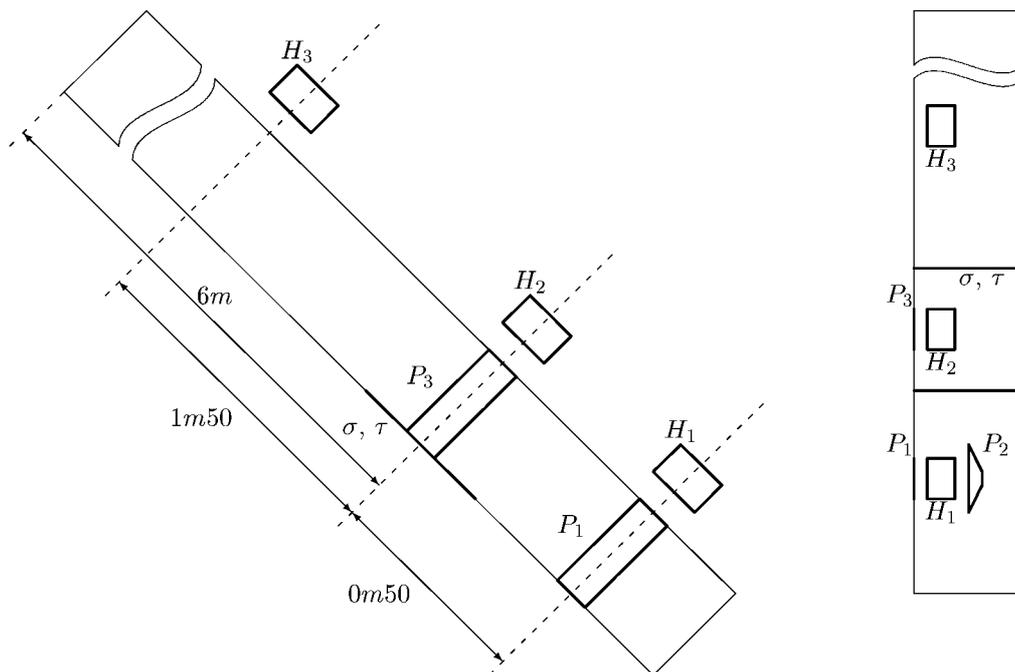


Figure 2 : Schéma de la disposition de l'instrumentation

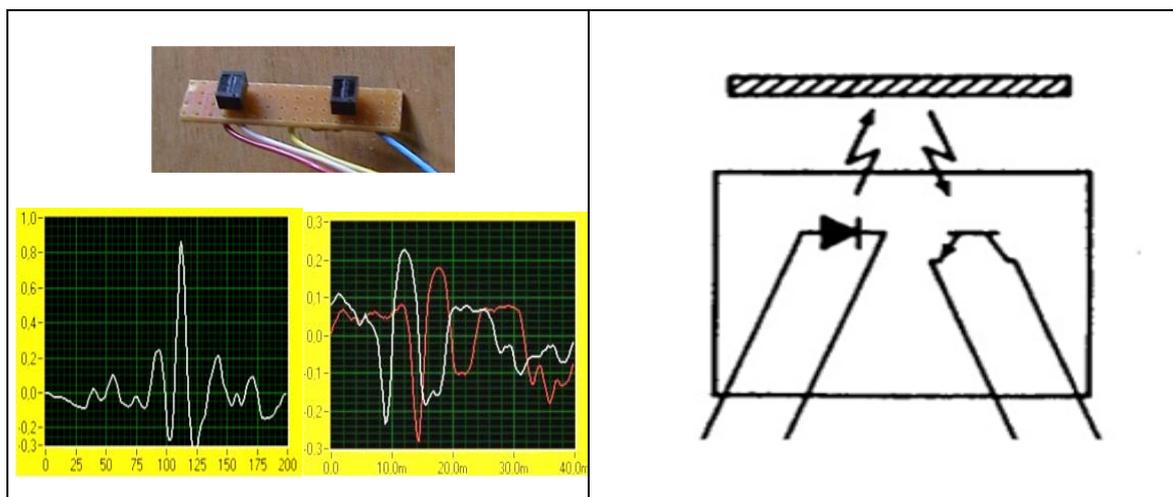


Figure 3 : Principe de fonctionnement du LED et Phototransistor

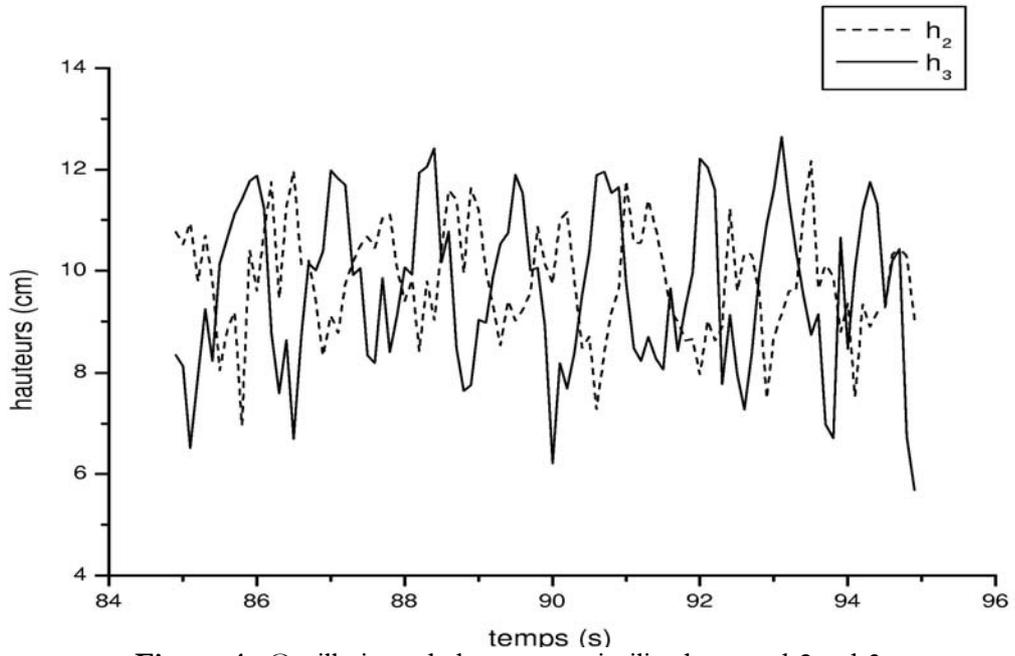


Figure 4 : Oscillations de hauteur et similitude entre  $h_2$  et  $h_3$

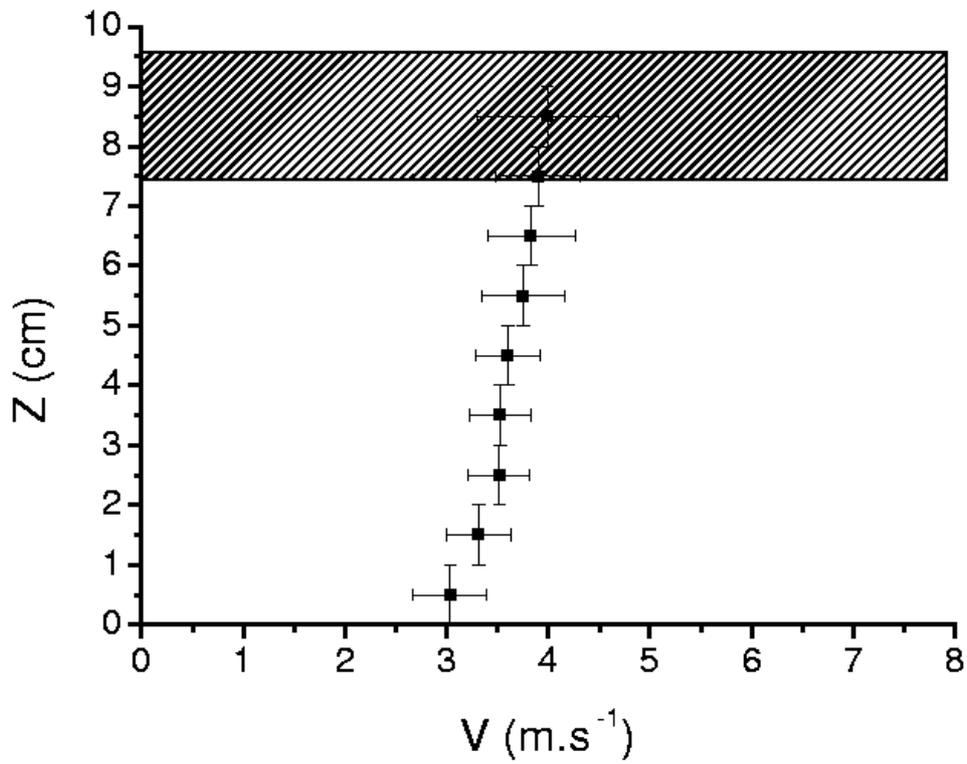


Figure 5-a : Profil de vitesse à 31°.

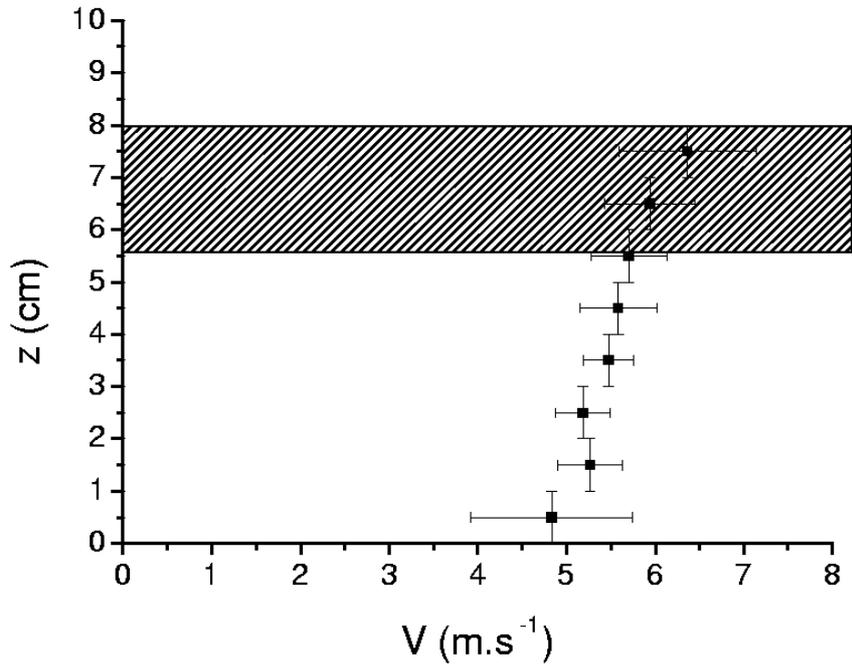


Figure 5-b : Profil de vitesse à 37°

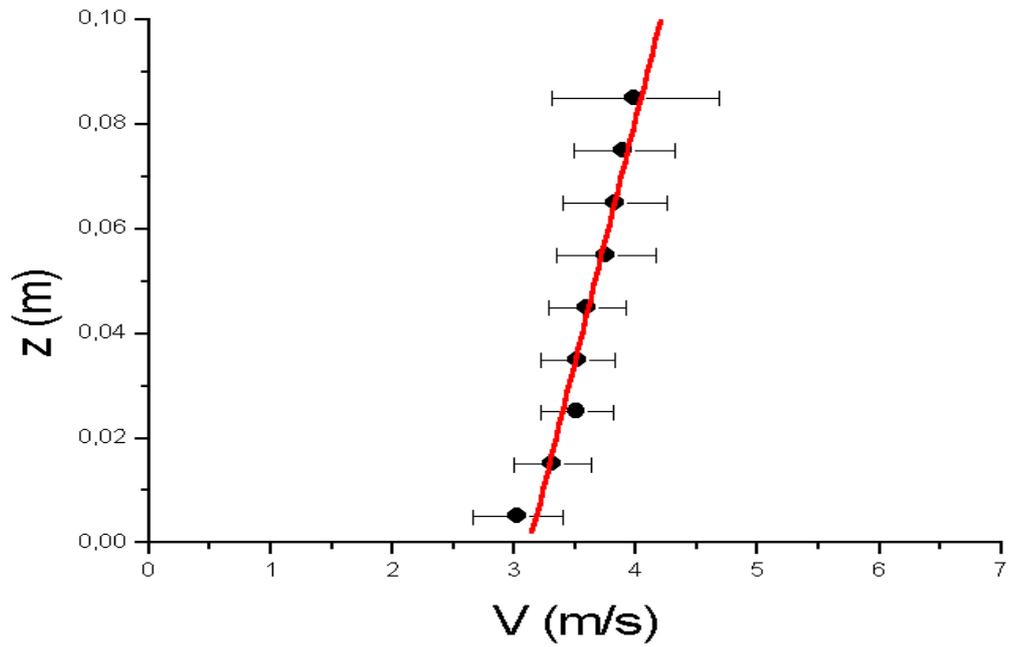


Figure 6 : Profil général

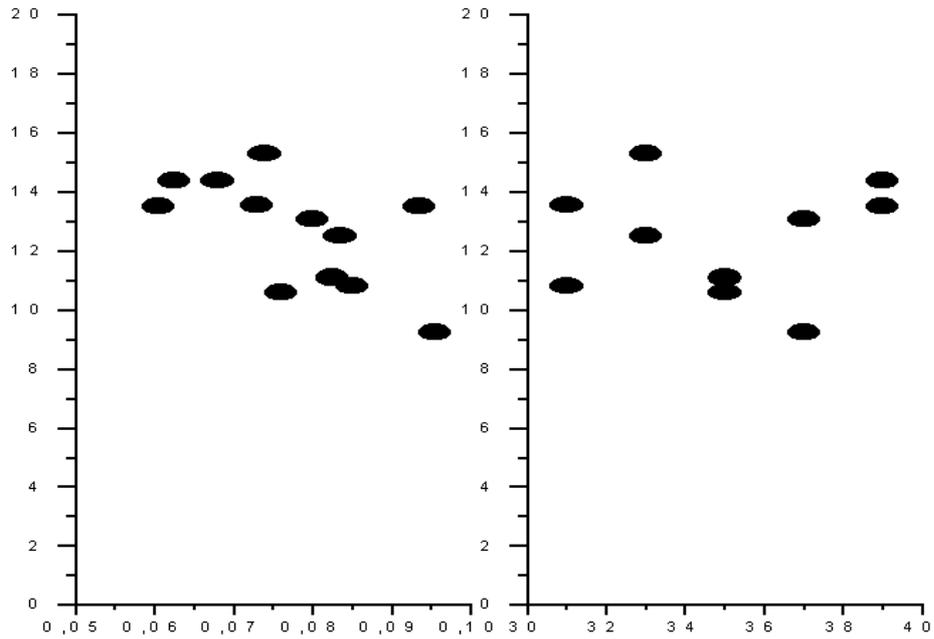


Figure 7 : Influence des paramètres de l'écoulement sur le taux de cisaillement

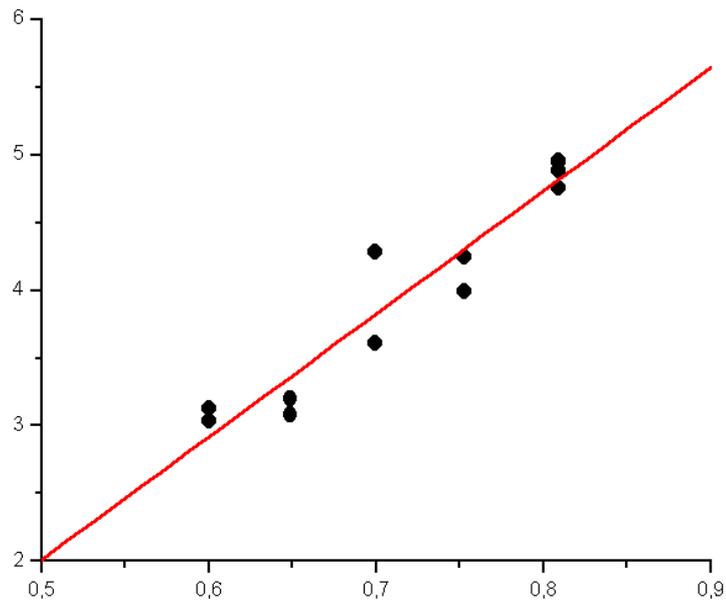


Figure 8 : Vitesse de glissement fonction de la tangente de l'angle de pente du canal

### 3 COMPARAISON AVEC D'AUTRES RESULTATS

Dans cette section, les deux caractéristiques de nos profils de vitesse (un gradient uniforme de vitesse et une vitesse de glissement à la base) sont comparées aux mesures précédemment obtenues par d'autres chercheurs du domaine.

### 3.1 Profils de vitesse dans des écoulements ou des avalanches de neige

Des profils de vitesse ont été obtenus dans des écoulements de neige en modèle réduit par [Nishimura89] et dans une vraie avalanche par [Dent98]. Les dimensions de ces expériences et des conditions avec lesquelles elles ont été faites sont assez différentes.

Un dispositif type canal a été employé par [Nishimura89]. Ce dispositif est de 10 cm de large et de 6 m de long. La neige a été fluidisée par l'injection d'air avant d'être lâchée dans le canal. La durée de l'écoulement est de trois secondes. Les profils de vitesse obtenus ont été interprétés en considérant la neige comme un fluide à seuil. Deux couches ont été identifiées : une couche supérieure dans laquelle les particules se déplacent à la même vitesse (Plug) et une couche cisailée en dessous avec un profil parabolique. L'épaisseur de la couche cisailée est de 2 centimètres.

Les mesures de [Dent98] ont été faites dans une vraie avalanche. Les profils de vitesses montraient l'existence d'une couche cisailée au fond dont le taux de cisaillement est de 3 à 4  $s^{-1}$ . Au dessus de cette couche, le taux de cisaillement tombe à une valeur au moins d'un ordre de grandeur plus petit. La couche mince au fond a été interprétée par les auteurs comme étant responsable de la vitesse de l'avalanche.

Nos profils diffèrent de ceux obtenus par [Nishimura89]. Mais le régime d'écoulement qu'il a modélisé diffère également du nôtre : l'écoulement que nous avons étudié est dans un état d'équilibre tandis que les siens sont dans un état transitoire. Les profils que nous avons mesurés sont semblables à ceux observés dans une vraie avalanche par [Dent98]: une couche mince (de 1 centimètre d'épaisseur) et fortement cisailée au fond surmontée par une couche supérieure avec un taux de cisaillement faible mais uniforme.

### 3.2 frottement de neige-neige

Comme expliqué plus haut, nos écoulements peuvent être considérés comme pleinement développés et quasi-permanents, de sorte que les quantités puissent être ramenées à une moyenne sur la durée de l'écoulement. Par conséquent, la force de frottement équilibre la force de gravité ce qui peut se traduire par une égalité entre le coefficient de frottement efficace défini comme le rapport de la contrainte tangentielle à la contrainte normale  $\mu = \frac{\tau}{\sigma}$ ,

et la tangente de la pente du canal :  $\mu = \tan \theta$ .

Sur la figure 8, la vitesse de glissement augmente linéairement avec la tangente de l'angle de pente dans la gamme étudiée:

$$v_s(\theta) = -V_0 \tan \theta_0 + V_0 \tan \theta$$

Ainsi, le coefficient de frottement augmente linéairement avec la vitesse de glissement dans la gamme étudiée:

$$v_s(\theta) = V_0 (\tan \theta - \tan \theta_0)$$

avec  $\tan \theta_0 = 0.28$  et  $V_0 = 9.1 \text{ m.s}^{-1}$ .

Le coefficient de frottement est alors donné par  $\mu = \tan \theta = 0.28 + \frac{v_s}{V_0}$

$$\mu = 0.28 + \frac{v_s}{V_0}$$

Des résultats semblables ont été rapportés par [Casassa91] qui a effectué des mesures de frottement entre deux couches rigides de neige en cellule de cisaillement. Il a obtenu des valeurs semblables de  $\mu_0$  aux températures auxquelles on a travaillé. Par contre, il a trouvé une vitesse  $V_0$  3 fois plus grande que celle que nous avons trouvée. Ainsi, dans nos expériences, le coefficient de frottement augmente 3 fois plus rapidement avec la vitesse de glissement que dans ses expériences. Cette différence est certainement liée aux matériaux utilisés (neige naturelle pour nous, vieille neige stockée pendant 6 mois pour Cassassa) et mode opératoire : notre écoulement est à surface libre alors que le sien est cisailé entre deux plaques rigides.

### 3.3 Loi d'écoulement hauteur débit

Tenant compte des équations précédentes le profil de vitesse dans l'écoulement peut finalement être décrit par :

$$v(z) = V_0 [\tan \theta - \tan \theta_0] + \dot{\gamma} z$$

avec  $\tan \theta_0 = \mu_0$ .

L'intégrale de ce profil sur l'épaisseur de l'écoulement permet d'obtenir la loi d'écoulement entre la vitesse moyenne de l'écoulement et sa hauteur dans la gamme des pentes et de hauteur étudiées:

$$\bar{u} = \int_0^h v(z) dz = V_0 [\tan \theta - \tan \theta_0] + \frac{1}{2} \dot{\gamma} h$$

Où  $V_0 \approx 9.1$ ,  $\tan \theta_0 = 0.28$ ,  $\theta_0 \approx 15^\circ$  et  $\dot{\gamma} = 15 s^{-1}$

## 4 CONCLUSION

L'installation expérimentale d'études des avalanches de neige dense construite au col du lac blanc a été fortement soutenue par le Pole Grenoblois d'Etudes et de Recherches pour la Prévention des Risques Naturels. Cette installation nous a permis de produire des écoulements de neige quasi-permanent et pleinement développés. Les angles de pentes explorées s'étendaient de  $31^\circ$  à  $39^\circ$ . Les profils de vitesse ont été moyennés sur la durée de l'écoulement et ont été analysés comme représentant un écoulement permanent établi. Les profils trouvés sont semblables à ceux observés dans une vraie avalanche par [Dent98]. Un taux de cisaillement uniforme dans le corps de l'écoulement et une couche active mince au fond, interprétée ici comme une vitesse de glissement. La dépendance de cette vitesse de glissement avec l'angle de pente est linéaire. Cette fonction a permis de remonter au coefficient de frottement effectif. Les lois d'évolution du coefficient de frottement avec la vitesse sont semblables aux mesures de frottement neige-neige obtenues par [casassa91]. En conclusion, l'intégration de la vitesse sur l'épaisseur de l'écoulement a permis d'accéder à la loi d'écoulement de la neige dense dans la gamme des pentes et des hauteurs étudiées. Cette nouvelle loi a été intégrée dans un code de dynamique des avalanches. Ce dernier est

en cours de test sur un couloir d'avalanche où 151 avalanches ont été répertoriées durant le siècle dernier.

## 5 BIBLIOGRAPHIE

- a) [Cassassa 91] : Cassassa, G., Narita, H., Maeno, N., 1991, 'Shear cell experiments of snow and ice friction', J., Appl. Phys., 69 (6), 3745-3756.
- b) [Dent 98] : Dent, J.D., Burrell, K.J., Schmidt, D.S., Louge, M.Y., Adams, E.E., Jazbutis, T.G., 1998, Density, velocity and friction measurements in a dry -snow avalanche', Annals of Glaciology, 26, 247-252.
- c) [Nishimura 89] : Nishimura, K., Maeno, N., 1989, Contribution of viscous forces to avalanche dynamics, Annals of Glaciology, 13, 202-206.