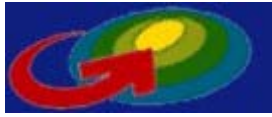


Pôle Grenoblois d'Etudes et de Recherche
pour la Prévention des Risques Naturels



La Recherche pour l'Ingénierie de
l'Agriculture et de l'Environnement



Etude des effets des structures de protection sur les écoulements d'avalanches de neige

Simulation physique sur modèles réduits

Rapport scientifique



UR ETNA – Grenoble

Thierry Faug

Florence Naaim-Bouvet

Mohamed Naaim

Sommaire

I ■ INTRODUCTION	3
II ■ MODELISATION PHYSIQUE DE L'INTERACTION ENTRE AVALANCHES DENSES ET STRUCTURES DE PROTECTION	4
II.1 PRECEDENTES ETUDES.....	4
II.1.1 Modélisation physique : critères de similitude.....	4
II.1.2 Interaction entre avalanches dense et obstacles	5
II.2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL.....	5
II.3 PRINCIPAUX RESULTATS.....	6
II.3.1 Avalanche de référence.....	6
II.3.2 Effets de la digue	8
II.4 COMPARAISON A D'AUTRES EXPERIMENTATIONS SIMILAIRES	9
II.5 CONCLUSION ET DEVELOPPEMENTS ULTERIEURS.....	10
III ■ MODELISATION PHYSIQUE DE L'INTERACTION ENTRE AVALANCHES POUFREUSES ET STRUCTURES DE PROTECTION	12
III.1 PRECEDENTES ETUDES	12
III.1.1 Modélisation physique : Les différentes approches et les critères de similitudes.....	12
III.1.2 Interaction entre avalanches poudreuses et obstacles.....	13
III.2 DISPOSITIF EXPERIMENTAL ET INSTRUMENTATION ASSOCIEE	13
III.3 PRINCIPAUX RESULTATS.....	14
III.3.1 Avalanche de référence	15
III.3.2 Effet des digues.....	16
III.4 CONCLUSIONS ET DEVELOPPEMENTS ULTERIEURS.....	19
IV ■ CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	20
V ■ REFERENCES	21

I ■ INTRODUCTION

En janvier et février 1999, une série d'avalanches de neige d'ampleur extrême a frappé les Alpes. Le nombre total de victimes a dépassé la moyenne annuelle européenne. En Autriche, 38 personnes ont été tuées à Galtür et Valzur. En Suisse, 12 personnes sont mortes à Evolène, et plus de 100 000 touristes ont été isolés dans des communes de montagne du fait de la fermeture des routes et des voies ferroviaires en raison de multiples avalanches. En France, 12 personnes ont été tuées par une avalanche ayant détruit un village près de Chamonix. L'hiver meurtrier de 1999 a rappelé que les avalanches peuvent être dévastatrices. La densité élevée de population dans les Alpes rend difficile pour les autorités l'utilisation d'un contrôle « actif » des avalanches – c'est-à-dire le déclenchement préventif d'avalanches de faible ampleur avant que ces dernières ne deviennent plus volumineuses. Ainsi, lorsque les densités de population sont importantes, seule la protection passive peut être envisagée. Elle consiste en la construction d'ouvrages de protection (digues d'arrêt et de déviation, structures dissipatrices de l'énergie, galeries pour protéger les routes...) dont les fonctions sont de contenir, dévier, freiner et stopper les avalanches. Actuellement, la conception et le dimensionnement de tels ouvrages restent basés sur une connaissance experte. La demande de la part des ingénieurs de terrain, tant sur le plan de la définition que sur celui du dimensionnement des ouvrages de protection contre les avalanches est forte. On peut citer l'exemple préoccupant de St-Hilaire du Touvet (en Isère) où les experts éprouvent de nombreuses difficultés pour définir le dispositif de protection à réaliser sur ce site. La connaissance de l'influence des structures de protection sur l'écoulement en terme de perte de charge et de déviation de l'écoulement présente donc un intérêt évident pour la définition de dispositifs de protection et le zonage des risques d'une part, et la conception et le dimensionnement des ouvrages de protection contre les avalanches d'autre part.

Pour mieux connaître les effets des obstacles sur les écoulements, l'équipe DYNAL, au sein de la division ETNA, s'est engagée dans un programme de recherche conséquent combinant différentes méthodes d'approche (données de terrain, modèles numériques, expérimentations sur modèle réduit et à grande échelle). L'ensemble de ce programme est en grande partie financé par le projet européen Cadzie (Catastrophic Avalanches : Defense structures and Zoning In Europe). Le projet de recherche proposé au PGRN, et qui s'insère dans cette dynamique globale, concerne l'approche expérimentale sur modèle réduit. Il a pour objectif de développer la connaissance des processus physiques de l'interaction d'un écoulement d'avalanche avec une structure de protection.

La méthodologie consiste à étudier l'influence d'obstacles de géométries simples sur des écoulements de matériaux modèles en laboratoire :

- ❑ Ecoulements granulaires pour les avalanches de neige dense
- ❑ Ecoulements de solutions salines pour les avalanches de neige poudreuse.

Ce rapport présente les dispositifs expérimentaux utilisés pour simuler les avalanches de neige dense et les aérosols en laboratoire, et les principaux résultats obtenus en ce qui concerne l'interaction de ces écoulements avec des obstacles.

II ■ MODELISATION PHYSIQUE DE L'INTERACTION ENTRE AVALANCHES DENSES ET STRUCTURES DE PROTECTION

L'avalanche de neige dense est constituée de particules de différentes tailles, formes et densités. La consistance du matériau dans les avalanches de neige dense (sèche à mouillée) prend plusieurs formes: blocs angulaires, boules, neige pulvérulente, pâtes... La granulométrie est très étendue en général (sauf dans le cas d'une neige sèche): 1 mm à 1 m. La masse volumique en écoulement varie de 100 à 300 kg.m³, et en arrêt de 200 à 600 kg.m³. L'échelle de hauteur de l'écoulement est métrique. Les vitesses atteintes peuvent être de l'ordre de 30 m/s.

Malgré les nombreux efforts déployés dans la communauté scientifique, la dynamique des avalanches de neige dense n'est pas encore complètement élucidée du fait du manque de données expérimentales fiables in situ. Le cas de l'interaction entre une digue et un écoulement d'avalanche a été étudié in situ par une équipe de Norvège mais le nombre de données reste faible [LAR 96]. L'amélioration des connaissances dans ce domaine serait sans aucun doute d'une grande utilité pour les bureaux d'études dont le rôle est de mettre en place des dispositifs de protection.

Il est incontestable qu'il est préférable d'obtenir des informations par l'étude du phénomène à l'échelle 1. Mais si cela n'est pas possible, les simulations en laboratoire constituent une bonne alternative : le nombre d'expériences n'est pas limité et les conditions initiales sont contrôlées.

Dans cette partie, nous présentons les expériences réalisées sur un plan incliné et les principaux résultats obtenus.

II.1 Précédentes études

II.1.1 Modélisation physique : critères de similitude

Contrairement aux avalanches de neige poudreuse où la modélisation physique sur modèles réduits a connu des développements importants avec trois types d'approches (fluide lourd dans l'eau [HOP 77] [BEG 91], particules dans l'eau [HER 91] ou particules dans l'air [BOZ 98]), une seule approche a été essentiellement développée concernant les avalanches de neige dense et sèche. On s'intéresse ici uniquement aux avalanches de neige dense et sèche donnant lieu aux événements majeurs donc d'intérêt premier en terme de protection d'un site. Ces dernières sont généralement assimilées à des écoulements granulaires secs (sable [CHU 95], billes [HUT 95] ou même balles de ping-pong [KEL 98]). Les dispositifs expérimentaux de laboratoire généralement mis en place sont constitués de deux parties : un canal incliné de pente forte représentant la zone d'écoulement et un plan incliné à faible pente représentant la zone d'arrêt. Une quantité fixée de matériau granulaire est stockée en haut du canal et lâchée instantanément pour provoquer l'avalanche granulaire.

La force motrice de ces écoulements est la gravité. La force de freinage est essentiellement le frottement à la base de l'écoulement. Les critères de similitude à considérer sont [HUT 96] :

- le nombre de Froude de l'écoulement : $Fr = \frac{u}{\sqrt{gh}}$ (u et h étant respectivement la vitesse moyenne

et la hauteur de l'écoulement)

- les angles de frottement statique et dynamique

- le nombre d'aspect : $A = \frac{h}{d}$ (d étant le diamètre des particules en écoulement)

Concernant l'interaction de ces écoulements avec des obstacles, on introduit deux nouveaux critères de similitude :

- la hauteur de l'obstacle H adimensionalisée par la hauteur de l'écoulement de référence (c'est-à-dire sans obstacle) : $\frac{H}{h}$

- le nombre de Froude de l'obstacle défini comme la racine carrée du rapport de l'énergie cinétique moyenne de l'écoulement à l'énergie potentielle liée à la hauteur de l'obstacle : $Fr_H = \frac{u}{\sqrt{gH}}$

II.1.2 Interaction entre avalanches dense et obstacles

Les travaux de recherche traitant de l'interaction entre écoulements granulaires et obstacles sont plutôt rares. Des premiers essais ont été réalisés en 1995 par Chu et al. [CHU 95]. Ces essais traitent essentiellement de l'impact d'une avalanche de grains sur la face amont d'une digue d'arrêt. Aucun essai n'a encore été réalisé sur des écoulements granulaires passant par dessus l'obstacle afin d'avoir accès à des informations telles que la réduction de la distance d'arrêt ou la dissipation d'énergie locale induites par l'obstacle.

II.2 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé est constitué d'un plan incliné de longueur 3 m, équipé d'un canal de longueur 93 cm et de largeur 20 cm (Cf. Figure 1 et Figure 3). Le matériau granulaire simulant la neige dense et sèche (billes de verre de 1 mm de diamètre dans notre cas) est stocké dans un réservoir en amont du canal et est lâché en contrôlant le débit par la hauteur d'ouverture de la vanne fermant le réservoir. Ce type de déclenchement conduit à des écoulements granulaires lents (nombre de Froude inférieur à 1). Il est également possible de lâcher brusquement le matériau granulaire pour générer des écoulements rapides (nombre de Froude supérieur à l'unité). Les expériences sont réalisées sans obstacle (avalanche de référence) ou avec un obstacle représentant une digue placée perpendiculairement au plan incliné en sortie du canal et obstruant entièrement ce dernier (Cf. Figure 2). La hauteur de l'obstacle testé variait entre 0.8 cm et 3.6 cm. Tous les essais ont été réalisés pour une inclinaison de canal fixée à 23° et une inclinaison du plan diminuant progressivement de 23° à 20.5° de la sortie du canal à la fin du plan. La masse de matériau granulaire initialement lâchée était égale à 20 kg. La rugosité de fond est réalisée en papier de verre (grain 60, la taille moyenne des aspérités est égale à 350 μm).



Figure 1. Le plan incliné



Figure 2. Avalanche interagissant avec la digue

Une caméra placée de côté permet de déterminer la hauteur de l'écoulement dans le canal. Deux caméras placées de face permettent de mesurer les vitesses de front de l'écoulement confiné dans le canal d'une part, et de l'écoulement s'étalant dans la zone d'arrêt d'autre part. La distance d'arrêt mesurée est comptée à partir de la sortie du canal.

	Nature	Laboratoire
Nombre de Froude	0 (arrêt)-12	0-12
Nombre d'aspect	10-1000	10-50
Angle de frottement statique	Très variable	28°
Angle de frottement dynamique	Très variable	21°

Tableau 1. Valeurs des nombres adimensionnels en laboratoire et in-situ

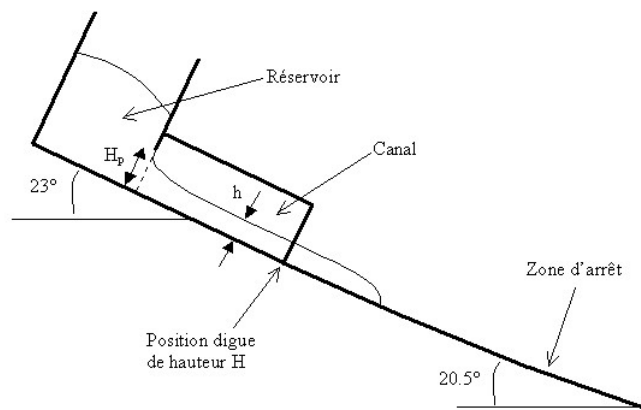


Figure 3. Vue schématique du dispositif et notations

II.3 Principaux résultats

II.3.1 Avalanche de référence

Afin d'étudier en détail l'effet des digues, il est nécessaire d'étudier l'écoulement sans obstacle que l'on nommera ultérieurement avalanche de référence.

Loi de frottement

Des travaux expérimentaux [POU 99] [POU 02] ont permis d'établir une loi de frottement empirique définissant la valeur du coefficient de frottement μ à la base de l'écoulement en fonction de la vitesse et de la hauteur de ce dernier :

$$\mu = \tan \delta_1 + (\tan \delta_2 - \tan \delta_1) \exp\left(-\frac{\beta h}{FrL}\right)$$

Avec δ_1 , δ_2 , L et β des paramètres déterminés expérimentalement. Dans notre cas d'étude (écoulements de billes de verre de diamètre 1 mm sur une rugosité en papier de verre de grain 60, la taille moyenne des aspérités étant de 300 μm), les valeurs respectives de δ_1 , δ_2 et L sont 21°, 28° et 4mm. δ_1 correspond à l'angle limite pour lequel h_{stop} tend vers l'infini et δ_2 correspond à l'angle limite pour lequel h_{stop} tend vers 0. La fonction h_{stop} correspond à la hauteur de matériau granulaire laissée

après l'arrêt d'écoulement permanent et uniforme à l'inclinaison θ . Cette fonction traduit une propriété importante des matériaux granulaires montrant que l'angle d'arrêt ainsi que l'angle de démarrage dépendent de la hauteur de matériau granulaire comme c'est le cas pour la neige. Le paramètre β (égal à 0.136 pour des billes de verre, indépendamment des conditions de rugosité) est défini par la suite.

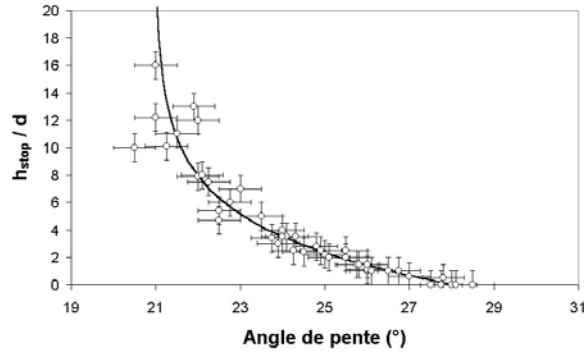


Figure 4. Fonction $h_{stop}(\theta)$. Hauteur de matériau granulaire adimensionalisée par le diamètre des particules après arrêt de l'écoulement en fonction de l'angle de pente pour des billes de verre de diamètre 1 mm sur une rugosité de papier de verre grain 60. Les incertitudes ont été estimées à 0.5° pour l'angle de pente et 1 mm pour la hauteur h_{stop}

Prédiction de la vitesse de front dans le canal

La hauteur et la vitesse de l'écoulement dans le canal sont contrôlés par la hauteur d'ouverture de la vanne fermant le réservoir. Le couple (u,h) a été mesuré pour plusieurs hauteurs d'ouverture H_p de la vanne (Cf. Figure 3).

En outre, la vitesse de front de l'écoulement est liée à la hauteur de l'écoulement par la relation empirique suivante [POU 99] :

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gh}} = \beta \frac{h}{h_{stop}(\theta)}$$

Cette relation montre que le nombre de Froude de l'écoulement varie linéairement en fonction de la hauteur de l'écoulement via la fonction $h_{stop}(\theta)$ et le coefficient β . Les données expérimentales sont bien reproduites par la formule empirique (voir Figure 5), ce qui valide cette loi pour nos écoulements, avec $\beta=0.136$ et $h_{stop}(\theta=23^\circ)=4.8d$, $d=1\text{mm}$ étant le diamètre des particules en écoulement. On note que les données expérimentales s'écartent de la loi pour des hauteurs d'ouverture H_p supérieures à 4.5cm. Ceci s'explique par le fait que, à partir de cette hauteur critique, les vitesses mesurées correspondent non plus à la vitesse de front de l'écoulement en masse mais à une vitesse supérieure liée à un front de saltation des particules. Nous avons donc choisi l'écoulement correspondant à une ouverture de 3.5 cm comme écoulement de référence dans le canal pour s'assurer que cet écoulement est dense sans saltation au front. L'écoulement de référence ainsi étudié est caractérisé par un nombre de Froude égal à 0.74.

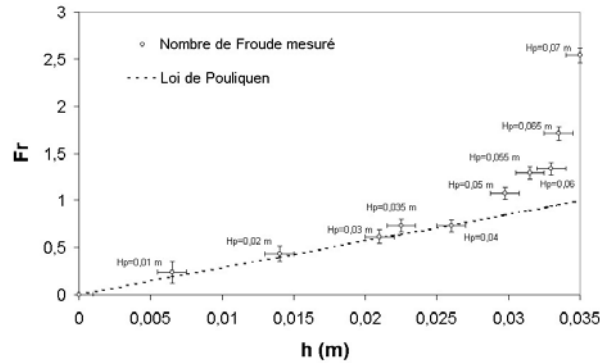


Figure 5. Nombre de l'écoulement en fonction de la hauteur de l'écoulement. Les incertitudes de mesures sont $\Delta h = 1 \text{ mm}$ pour la hauteur et $\Delta Fr = (\Delta u/u + 0.5\Delta h/h)$ pour le nombre de Froude avec $\Delta u = 0.025 \text{ m.s}^{-1}$

Vitesse de front dans la zone d'arrêt

L'évolution de la vitesse de front dans la zone d'arrêt a été mesurée à l'aide d'une caméra numérique. Vu les fluctuations importantes de vitesse concernant les mesures (vitesses instantanées), les points expérimentaux donnant l'évolution de la distance parcourue en fonction du temps ont été extrapolés par une fonction polynomiale. La dérivation de cette fonction polynomiale obtenue nous permet d'obtenir l'évolution de la vitesse. Cette méthode a été utilisée afin de pouvoir définir « proprement » l'évolution de la vitesse de front en fonction de la distance parcourue dans la zone d'arrêt en vue de comparer l'écoulement de référence aux écoulements avec obstacle.

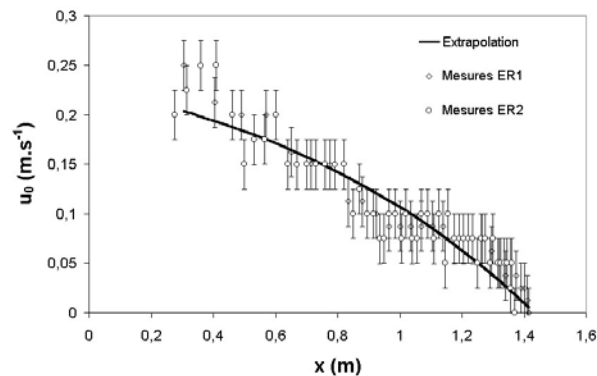


Figure 6. Evolution de la vitesse de front en fonction de la distance parcourue dans la zone d'arrêt. La vitesse $u_0(x)$ correspond à l'écoulement de référence. L'incertitude de mesure sur la vitesse a été estimée à 0.025 m.s^{-1}

II.3.2 Effets de la digue

On présente ici la réduction de distance d'arrêt et les pertes de vitesse de front locales induites par la digue.

Réduction de la distance d'arrêt

Pour chaque hauteur de digue testée (digue placée perpendiculairement au plan incliné en sortie de canal et obstruant entièrement ce dernier), nous avons mesuré la distance d'arrêt, comptée à partir de la sortie du canal, de l'avalanche. On note D la distance d'arrêt avec obstacle. On constate sans surprise que la distance d'arrêt diminue avec la hauteur de l'obstacle. Il faut noter que pour l'obstacle de hauteur 3.6 cm, tout le matériau granulaire est resté bloqué derrière l'obstacle ($D=0$).

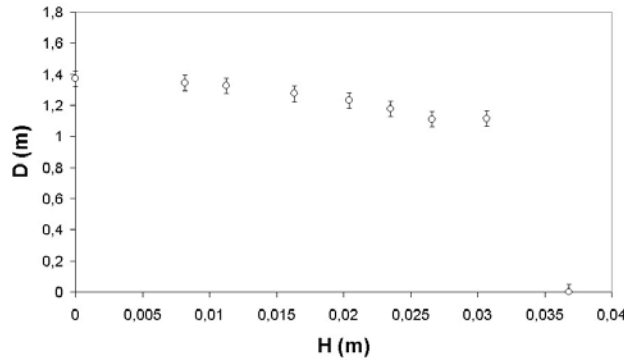


Figure 7. Distance d'arrêt en fonction de la hauteur de l'obstacle

Perte de vitesse locale

La méthode d'extrapolation des courbes décrivant la distance parcourue dans la zone d'arrêt en fonction du temps par une fonction polynomiale a permis d'avoir accès à l'évolution de la réduction de vitesse définie par le rapport $U(x)/u_0(x)$ en fonction de la distance parcourue, où $U(x)$ correspond à la vitesse de l'écoulement avec obstacle. Les données obtenues sont reportées sur la Figure 8. Sur cette figure, on constate qu'il existe une zone, jusqu'à environ 55 cm en aval de la sortie du canal ($x/d=0,4$), dans laquelle la réduction de vitesse est pratiquement constante indépendante du point où l'on se trouve. Cette observation nous permet de définir une perte de vitesse locale induite par l'obstacle. Les pertes de vitesse de front locales ont pu donc être estimées en fonction de la hauteur de l'obstacle adimensionnée comme l'illustre la Figure 9. Ce premier résultat montre que les pertes de vitesse locales peuvent être importantes mais les effets sur la distance d'arrêt ne sont pas pour autant significatifs.

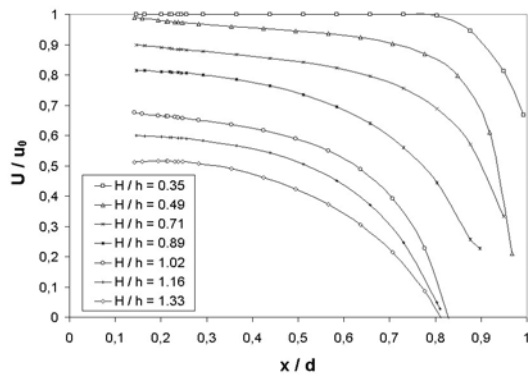


Figure 8. Réduction de vitesse en fonction de la distance parcourue adimensionnée par la distance d'arrêt de référence d

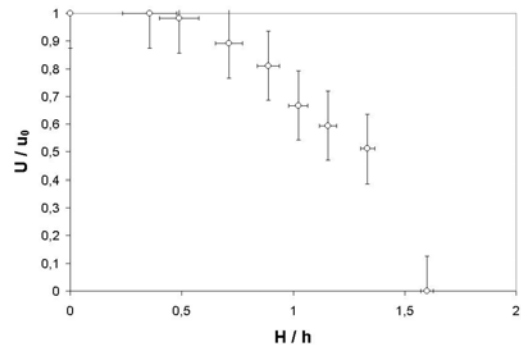


Figure 9. Rapport de la vitesse de front en aval de l'obstacle adimensionnée en fonction de la hauteur de l'obstacle adimensionnée. Les incertitudes de mesure ont été estimées à $\Delta Y = \Delta u/u_0$ pour la réduction de vitesse avec $\Delta u = 0,025 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ en posant $Y = U/u_0$ et $\Delta(H/h) = \Delta h/H$ avec $\Delta h = 1 \text{ mm}$ pour la hauteur de l'obstacle adimensionnée

II.4 Comparaison à d'autres expérimentations similaires

Dans les expérimentations présentées précédemment, le mode de déclenchement est le contrôle du débit par la hauteur d'ouverture de la vanne. Ce type de déclenchement conduit à des écoulements lents caractérisés par un nombre de Froude faible (inférieur à l'unité). Dans le cadre du projet européen Cadzie, un grand nombre d'expérimentations ont été conduites pour des écoulements rapides

(nombre de Froude variant de 3 à 12) obtenus à partir du lâcher brusque de la quantité de matériau granulaire initiale [NAA 01].

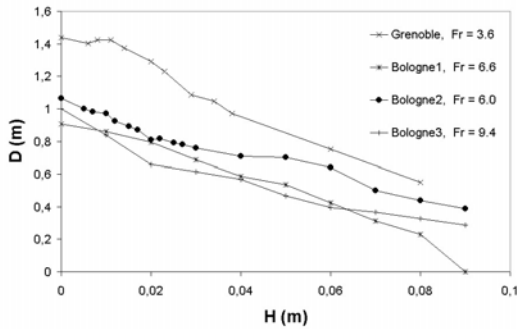


Figure 10. Distance d'arrêt en fonction de la hauteur de l'obstacle. Résultats obtenus sur les dispositifs expérimentaux du Cemagref et du département d'hydraulique de l'Université de Bologne

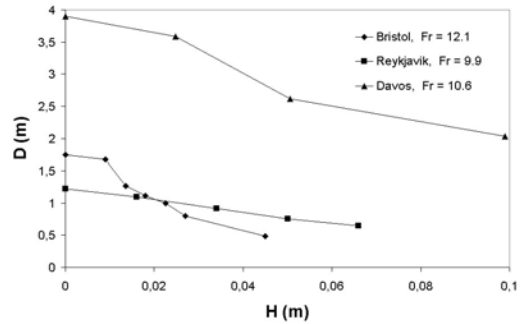


Figure 11. Distance d'arrêt en fonction de la hauteur de l'obstacle. Résultats obtenus sur les dispositifs expérimentaux de Bristol, Davos et Reykjavik [HAK 01]

Toutes les courbes $D(H)$ présentées sur la Figure 10 et la Figure 11 ont été reportées sur un graphe unique en variables adimensionnelles. En effet, sur la Figure 12, on a reporté la distance d'arrêt avec obstacle adimensionnalisée par la distance d'arrêt de l'avalanche de référence (D/d) en fonction de la hauteur de l'obstacle adimensionnalisée par la hauteur de l'écoulement de référence (H/h). Toutes les données, pourtant obtenues dans des conditions d'expérimentations différentes (différents matériaux granulaires et différentes échelles), se regroupent sur une courbe unique. Ce résultat présente un intérêt important dans le sens où il pourrait donc s'appliquer à des échelles plus grandes avec d'autres matériaux granulaires. Sur la Figure 12, il faut noter que dans le cas des expériences conduites et décrites en détail précédemment (Froude faible), la hauteur critique pour laquelle tout le matériau granulaire est stocké ($D=0$) est bien plus faible que dans le cas des expériences conduites dans le cadre du projet européen Cadzie (Froude élevé). Une voie d'investigation intéressante est l'étude de cette hauteur critique en fonction de l'énergie cinétique initiale de l'écoulement de référence.

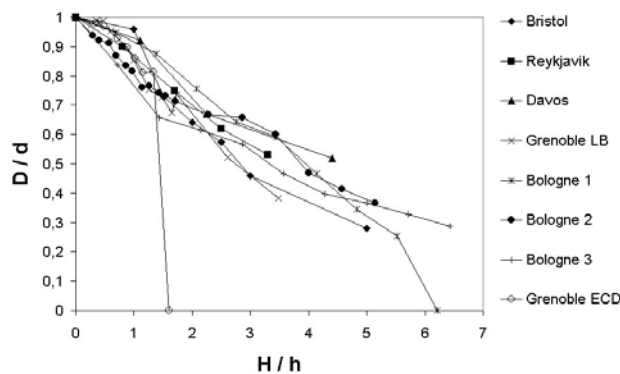


Figure 12. Distance d'arrêt adimensionnalisée en fonction de la hauteur de l'obstacle adimensionnée. (LB=Lâchers brusques, ECD=Ecoulements contrôlés par le débit)

II.5 Conclusion et développements ultérieurs

Le déclenchement de l'écoulement de référence est assuré par le contrôle du débit par la hauteur d'ouverture de la vanne. L'étude du nombre de Froude de l'écoulement en fonction de sa hauteur pour plusieurs hauteurs d'ouverture a permis de caractériser un écoulement de référence en régime dense sans apparition de saltation au front de l'écoulement. Cet écoulement est caractérisé par un nombre de Froude faible, inférieur à l'unité (régime d'écoulement lent).

Nous avons étudié l'influence de la hauteur d'une digue sur la réduction de la distance d'arrêt de cet écoulement. Les effets en termes de réduction de la distance d'arrêt sont similaires à ceux observés dans une série d'expérimentations réalisées dans le cadre du projet européen Cadzie. Ces expérimentations portaient sur des écoulements caractérisés par un nombre de Froude plus élevé, variant de 3 à 12 (régime inertiel). Ce résultat montre que les effets de la hauteur de l'obstacle sur la distance d'arrêt de l'avalanche granulaire sont identiques indépendamment de l'échelle de l'expérimentation et du matériau granulaire utilisé. On peut donc espérer que les résultats sont applicables à des échelles plus grandes et avec d'autres matériaux granulaires. Par exemple, une digue de hauteur deux fois supérieure à l'écoulement de référence conduit à une réduction de la distance d'arrêt de l'ordre de 30%. La différence entre les régimes d'écoulements lent et inertiel est que, dans le premier régime, la hauteur critique à partir de laquelle tout le matériau granulaire est stocké derrière l'obstacle est beaucoup plus faible vu la faible énergie cinétique de l'écoulement.

Contrairement au cas des expérimentations conduites pour des nombres de Froude élevés, dans le cadre de cette étude il a été possible d'estimer indirectement les pertes de vitesse locales induites par l'ouvrage, à partir des profils de vitesse de front extrapolés. Les mesures montrent que les pertes de vitesse donc les réductions de pression dynamique peuvent être importantes mais la distance d'arrêt n'est pas fortement réduite pour autant. Par exemple, une digue de hauteur égale à celle de l'écoulement de référence peut engendrer des pertes de vitesse locales de l'ordre de 35%, la réduction de la distance d'arrêt n'étant que de 10-15%.

Ces résultats sont très encourageants mais sont actuellement limités par deux grandes questions qui sont liées :

- l'utilisation du matériau granulaire comme matériau modèle est-elle valide ? Des expérimentations similaires menées avec de la neige sur le canal expérimental de l'Alpe d'Huez devraient permettre de répondre partiellement à cette question.

- Comment passer de l'échelle du laboratoire à l'échelle 1 ? Des simulations numériques seront utilisées pour apporter des éléments de réponse.

III. MODELISATION PHYSIQUE DE L'INTERACTION ENTRE AVALANCHES POUDREUSES ET STRUCTURES DE PROTECTION

L'avalanche de neige poudreuse est constituée d'une suspension de particules de glace dans l'air. Elle apparaît sous certaines conditions (neige froide, sèche et à faible cohésion) sous la forme d'un nuage de neige au sommet de l'écoulement dense. L'avalanche est considérée comme une avalanche poudreuse « pure » lorsque la partie dense s'écoulant le long de la pente est inexistante [McC 93]. Sous certaines conditions, la suspension poudreuse peut atteindre 1000 m de longueur, 500 m de largeur et 100 m de hauteur avec une densité de 2-5 kg/m³ [NIS 95]. Les vitesses atteintes peuvent être de l'ordre de 100 m/s et les pressions exercées de l'ordre de 10-50 kPa. [NIS 95].

Malgré les nombreux efforts déployés dans la communauté scientifique, la dynamique des avalanches poudreuses n'est pas encore complètement élucidée du fait du manque de données expérimentales fiables in situ. Seules quelques équipes en Norvège, en Suisse et au Japon ont réalisé des campagnes de mesures systématiques et ont obtenu des séries de données pertinentes. Quelques données sur l'interaction entre une digue et un écoulement d'avalanche poudreuse ont été obtenues in situ [LAR 96]. L'amélioration des connaissances dans ce domaine serait sans aucun doute d'une grande utilité pour les bureaux d'études dont le rôle est de mettre en place des dispositifs de protection.

Il est incontestable qu'il est préférable d'obtenir des informations par l'étude du phénomène à l'échelle 1. Mais si cela n'est pas possible, comme nous l'avons évoqué précédemment, les simulations en laboratoire constituent une bonne alternative : le nombre d'expériences n'est pas limité et les conditions initiales sont contrôlées.

Dans cette partie, nous présentons les expériences réalisées dans un bassin noyé et les principaux résultats obtenus.

III.1 Précédentes études

III.1.1 Modélisation physique : Les différentes approches et les critères de similitudes

Par le passé, différentes équipes ont réalisé des modélisations physiques d'avalanches poudreuses. On peut ainsi distinguer trois approches différentes :

- utilisation d'un fluide lourd dans l'eau (simulation par courant de gravité),
- utilisation de particules dans l'eau,
- utilisation de particules dans l'air.

- Hopfinger et Tochon-Danguy [HOP 77], et par la suite Beghin [BEG 91] ont utilisé un concept de courant de densité et de bouffée de densité. L'avalanche est représentée par un fluide lourd s'écoulant dans un fluide plus léger. Dans le bassin noyé utilisé, l'injection de fluide lourd peut être continue (ou au contraire de courte durée. Dans le cas d'une injection de courte durée, où l'on parlera de bouffée de densité [BEG 91], le corps de l'avalanche est quasi-inexistant et l'on représente une avalanche dite « courte ». Dans le cas d'une injection continue, où l'on parlera de courant de gravité, le corps de l'avalanche influe sur la dynamique de la tête et l'on représente une avalanche dite « longue ».

Lorsque le nombre de Reynolds est suffisamment important, la similitude est respectée si le nombre de Froude densimétrique $\frac{U^2}{gH \frac{\Delta\rho}{\rho}}$ et le rapport de densité entre fluide lourd et fluide ambiant $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ sont

respectés (où U est la vitesse du front, H est la hauteur de l'écoulement et $\frac{\Delta\rho}{\rho}$ est la densité relative).

Cependant le respect simultané de ces deux rapports en laboratoire conduit à une vitesse élevée, impliquant des dimensions de bassin considérables. De fait, le rapport de densité n'est pas respecté.

Dans les expériences de laboratoire, il est de l'ordre de 1,2 alors que dans le cas d'avalanches poudreuses réelles, ce rapport est de l'ordre de 10.

- Cependant cette dernière modélisation ne peut être utilisée que lorsque la sédimentation des particules ne joue qu'un rôle marginal, ce qui n'est pas le cas de la zone d'arrêt. C'est pourquoi, Hermann [HER 91] a développé un modèle physique bi-phasique. Dans ce cas précis, l'avalanche de neige poudreuse est simulée par une suspension de particules de polystyrène dans l'eau. Aux deux précédents critères de similitude vient s'ajouter le rapport entre la vitesse de chute des particules et la vitesse de front de l'écoulement $\frac{U}{U_{fall}}$ (où U_{fall} est la vitesse de chute des particules). Tout comme précédemment, il n'est pas possible de respecter le rapport de densité.

- D'autres tentatives ont aussi été réalisées dans l'air par Bozhinskiy [BOZ 98]. Les auteurs considèrent l'équation mathématique représentant un solide s'écoulant le long d'une pente et en déduisent les paramètres adimensionnels. En fait ces critères de similitude ne permettent pas de décrire le développement du nuage aérosol.

III.1.2 Interaction entre avalanches poudreuses et obstacles

Les travaux de recherche traitant de l'interaction entre courant de gravité et obstacles sont plutôt rares. De premiers essais ont été réalisés dans les années soixante-dix par Hopfinger [HOP 77]. Par la suite, une série d'expérimentations traitant de interaction entre bouffée de gravité et digues d'arrêt digues déflectrices a été menée au Cemagref par Beghin [BEG 90] puis Augé [AUG 95] pour des configurations bi-dimensionnelles et tri-dimensionnelles. Plus récemment, Lane [LAN 00] a étudié les interactions entre courant de gravité et obstacles pour une configuration bi-dimensionnel. Cependant les différents auteurs n'ont eu accès qu'à la vitesse de front et n'ont pu déterminer la vitesse à l'intérieur de l'écoulement.

III.2 Dispositif expérimental et instrumentation associée

Le dispositif expérimental est constitué d'une cuve vitrée de 4m*2m*4.5 m (Figure 13). Les bouffées de gravité s'écoulent le long d'un plan incliné à partir d'un réservoir (0.2m*0.15m) de 4l disposant d'une vanne. L'avalanche poudreuse est simulée par un fluide lourd (eau salée et kaolin) qui s'écoule dans un fluide plus léger (eau). La densité de l'eau salée est de 1.185 mais la densité du mélange est de 1.2. L'addition de kaolin permet d'une part de visualiser l'écoulement et d'autre part d'ensemencer la solution en particules afin de permettre l'utilisation d'un vélocimètre ultrasonique à effet Doppler. Contrairement à ce qui se produit en réalité, l'avalanche simulée démarre sous forme d'avalanche poudreuse. De plus, l'entraînement des particules n'est pas modélisé. Des expérimentations bi-dimensionnelles et tri-dimensionnelles sont ainsi réalisées. Dans le cas des avalanches bi-dimensionnelles, l'écoulement est confiné dans un canal (l = 2.85m, L=0.15 m, H=0.5 m). Dans le cas tri-dimensionnel, l'écoulement est tout d'abord confiné dans un canal (l = 0.47m, L=0.15 m, H=0.3 m) avant de s'écouler le long d'un plan incliné de 2 mètres de large. Les expériences sont réalisées sans obstacle (avalanche de référence) ou avec un obstacle (Figure 14), représentant une digue d'arrêt, qui est placée perpendiculaire au plan incliné et à l'écoulement, 97 cm en aval du réservoir (soit 50 cm en aval de la fin du premier canal). L'obstacle qui peut atteindre 0.75 fois la hauteur de l'écoulement de référence a une largeur de 50 cm dans le cas tridimensionnel et obstrue complètement le canal dans le cas bi-dimensionnel. Tous les essais sont réalisés pour une pente de 10° avec un volume initial dans le réservoir de 2 l. La nature turbulente de l'écoulement implique de moyenniser les résultats obtenus à partir de 5 expériences identiques (Figure 17).

Deux caméras (de face et de côté) permettent de déterminer la hauteur, la forme et la vitesse de front de l'avalanche. Un vélocimètre ultrasonique à effet Doppler permet de déterminer la composante de la vitesse de l'écoulement suivant l'axe du capteur. La vitesse est déterminée à 4 cm du capteur de façon

à limiter les effets de sa perturbation. La zone de mesure est un cylindre de 10 mm de diamètre et 1 mm d'épaisseur.



Figure 13. Le bassin noyé et le canal immergé

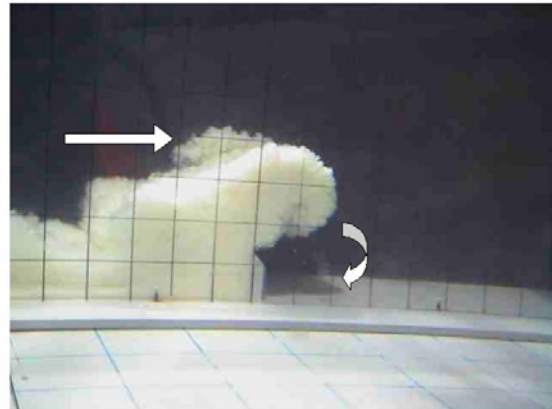


Figure 14. Avalanche 2D au droit de l'obstacle

Les critères de similitude utilisés, sont comparés dans le tableau suivant avec les nombres adimensionnels obtenus in situ.

	Nature	Laboratoire
Rapport de densité $\frac{\Delta\rho}{\rho}$	4	$2 \cdot 10^{-1}$
Nombre de Reynolds Re	10^8	10^4
Nombre de Froude densimétrique $\frac{U^2}{gH \frac{\Delta\rho}{\rho}}$	5	5

Tableau 2. Valeurs des nombres adimensionnels en laboratoire et in-situ

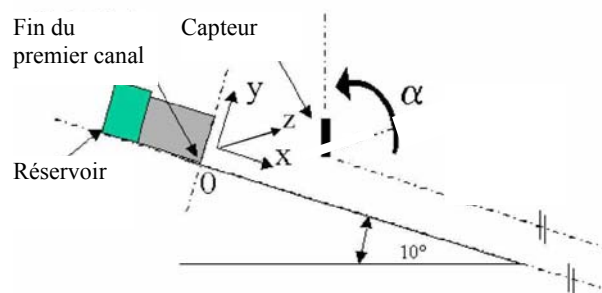


Figure 15. Notations

III.3 Principaux résultats

Avant d'étudier en détail l'effet des digues d'arrêt, il est nécessaire d'étudier l'écoulement sans obstacle que l'on nommera ultérieurement avalanche de référence.

III.3.1 Avalanche de référence

Vitesse horizontale

La phase d'accélération qui apparaît après le lâcher du volume (la vitesse du front U_F est nulle au sein du réservoir) est suivie par une phase de décélération (Figure 16). Cette vitesse dépend très fortement des conditions initiales (pente, volume initial et densité) [BEG 91]. La forte décélération observée pour la configuration tri-dimensionnelle et ce pour les mêmes conditions initiales, s'explique par la croissance latérale du nuage. La Figure 17 représente un profil de vitesse moyen. Etant donné que le déclenchement de la vanne n'est pas automatique, à un temps t donné, il y a un décalage aléatoire entre les positions du front de l'avalanche. La donnée qui nous intéresse in fine est la pression maximale ; c'est pourquoi nous avons recalé les courbes par rapport à la vitesse maximale enregistrée avant d'effectuer des moyennes sur les cinq expériences identiques réalisées. Il apparaît ainsi clairement sur la Figure 17 que la vitesse dans la tête de l'avalanche est plus importante que la vitesse du front de l'avalanche. Le corps de l'avalanche est quand à lui quasi-inexistant, ce qui est caractéristique d'une bouffée de gravité par opposition à un courant de gravité.

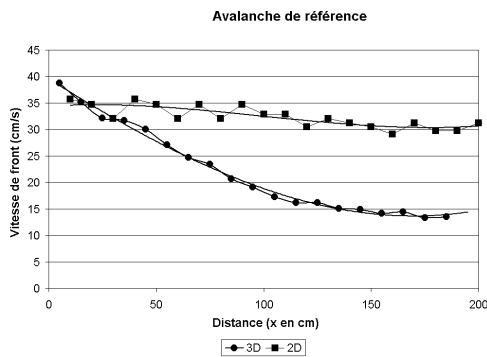


Figure 16. Vitesse de front pour l'avalanche de référence (configuration 2D et 3D)

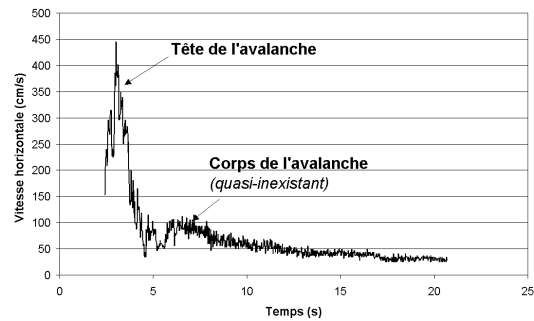


Figure 17. Valeurs moyennées sur 5 expériences pour la configuration 2D

On observe ainsi que dans le cas de la simulation bi-dimensionnelle le rapport entre la vitesse maximale enregistré et la vitesse du front est de 1.5, ce qui est en accord avec les résultats obtenus par Hopfinger [HOP 77]. Ce dernier suggère cependant que ce rapport puisse dépendre de l'angle de la pente. Du fait de la forme des profils de vitesse, ce rapport diminue avec la hauteur, excepté à proximité du sol où la résolution spatiale de notre capteur ne nous permet pas d'obtenir de points de mesures. La distance couverte par l'avalanche n'intervient pas sur la valeur de ce rapport. Dans le cas de la configuration tri-dimensionnelle, la valeur de ce rapport ne diffère que très peu puisqu'elle atteint 1.8.

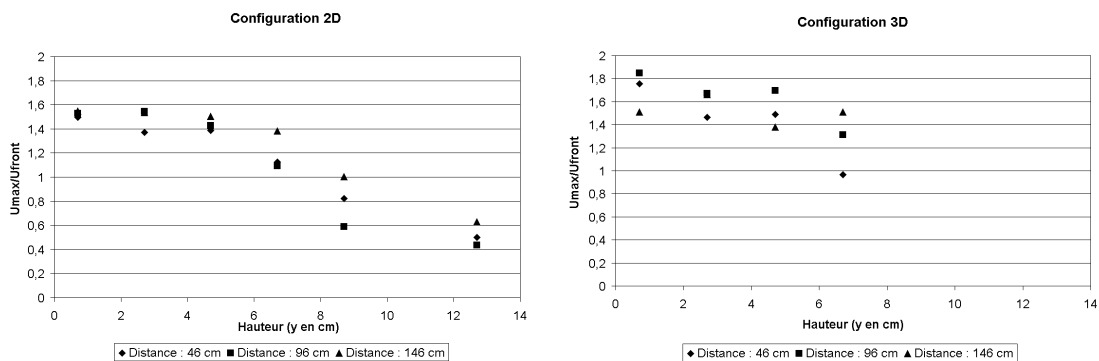


Figure 18. Valeur de U_{max}/U_{front} en fonction de la hauteur pour différentes distances (simulations 2D et 3D)

Vitesse verticale

Pour une avalanche s'écoulant de la droite vers la gauche, le tourbillon frontal tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre ce qui est caractéristique d'une force de frottement d'air prépondérante par rapport à la force de frottement exercée par le sol. Ceci apparaît clairement sur la Figure 19, où à une distance donnée du réservoir, la vitesse verticale est tout d'abord positive pendant une courte durée. Il est intéressant d'observer la forte valeur cette vitesse qui peut atteindre 87% de la vitesse du front pour la simulation tri-dimensionnelle et 66% pour la simulation bi-dimensionnelle. Ces valeurs permettent d'expliquer l'arrachement d'obstacles comme les arbres, les toits ou encore les pylônes électriques lors du passage d'une avalanche poudreuse.

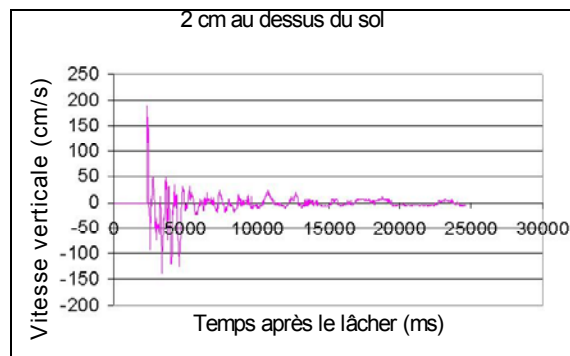


Figure 19. Vitesses verticales en fonction du temps (à $x=50$ cm) au sein de l'avalanche de référence

III.3.2 Effet des digues

La mise en place de digues entraîne une diminution de la vitesse du front. Le résultat obtenu est sans surprise. Plus la digue est haute, plus la réduction est importante. Plus on s'éloigne de la digue moins son effet se fait sentir (Figure 20).

Par ailleurs, les digues sont moins efficaces lorsqu'elles sont placées dans un couloir canalisé (configuration 2D) que lorsqu'elles sont implantées dans une zone ouverte (configuration 3D) du fait du contournement latéral de la digue dans ce dernier cas.

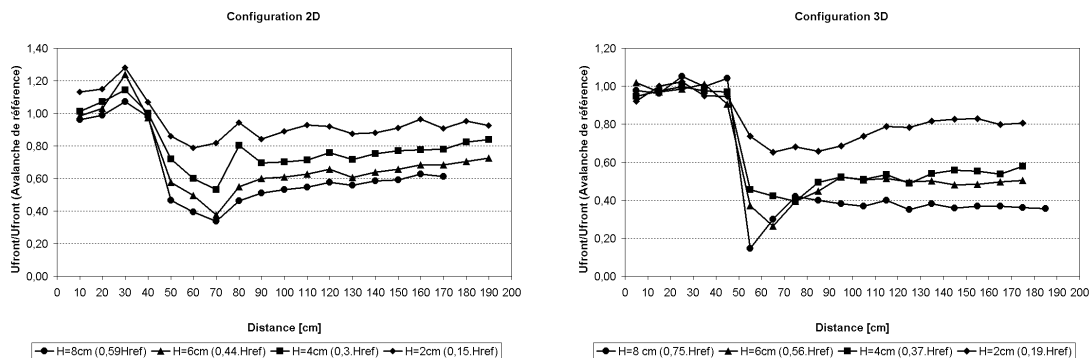


Figure 20. Valeurs de U_{max}/U_{front} en fonction de la distance pour différentes hauteurs de digues (simulations 2D et 3D)

Les résultats obtenus sont cohérents avec ceux issus des précédentes expérimentations de Beghin et Closet [BEG, 90] puis Auge [AUG, 95]. Cependant comme il a été indiqué en introduction, ces études

ne traitent que de la vitesse du front. Sachant que la vitesse à l'intérieur de la tête de l'avalanche est supérieure à la vitesse du front, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à la modification du rapport vitesse horizontale maximale sur vitesse de front pour les différentes hauteurs de digues considérées. Dans le cas de la configuration bi-dimensionnelle, ce rapport est une fonction croissante de la hauteur et peut atteindre une valeur de 1.9 (Figure 21). Ceci signifie que l'utilisation de la seule vitesse du front conduit à une surestimation de l'efficacité des digues. Dans le cas tridimensionnel (Figure 22), cette tendance n'est pas aussi prononcée. Il faut cependant ajouter que dans ce dernier cas, la dispersion des points de mesures est importante et qu'une moyenne sur 7 à 10 expériences identiques aurait sans doute été souhaitable.

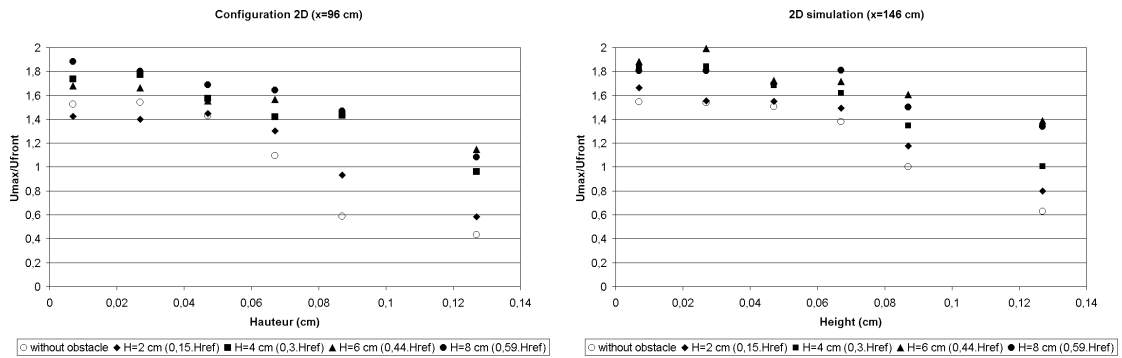


Figure 21. Rapport entre la vitesse horizontale maximale (moyenne sur 5 essais) et la vitesse de front en fonction de la hauteur pour la configuration 2D à $x=96$ cm et $x=146$ cm

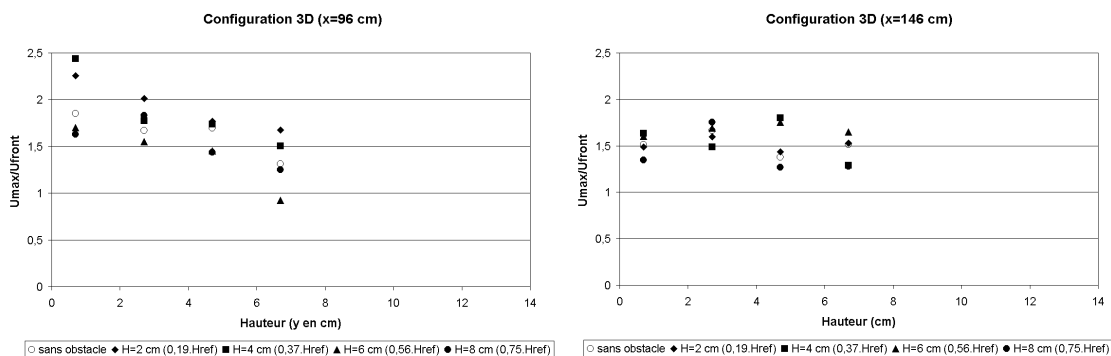


Figure 22. Rapport entre la vitesse horizontale maximale (moyenne sur 5 essais) et la vitesse de front en fonction de la hauteur pour la configuration 3D à $x=96$ cm et $x=146$ cm

En fait les vitesses sont plus redistribuées que réduites. La Figure 23 montre clairement qu'il y a une accélération de la vitesse dans la partie haute du profil et une réduction à proximité de la surface du sol.

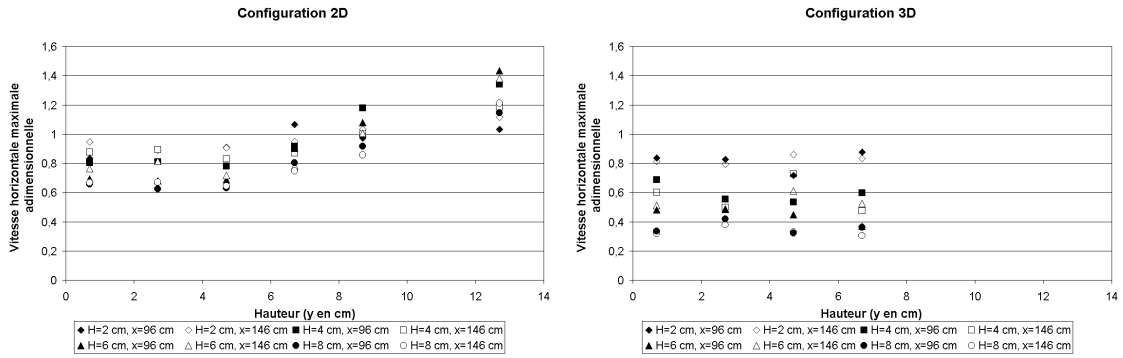


Figure 23. Rapport entre les vitesses horizontales maximales avec et sans digues en fonction de la hauteur pour les configurations 2D et 3D

Une augmentation de la hauteur des digues conduit à une augmentation de la vitesse verticale au-dessus de ces dernières. Cette augmentation est une fonction croissante de la hauteur des digues dans la gamme testée et peut être le triple de la valeur observée dans l'avalanche de référence. Cet effet est plus prononcé dans le cas tridimensionnel. A l'inverse on note une réduction des vitesses verticales positives ou négatives en aval de la digue (voir Figure 24 et Figure 25) d'autant plus marquée que la hauteur des digues est importante.

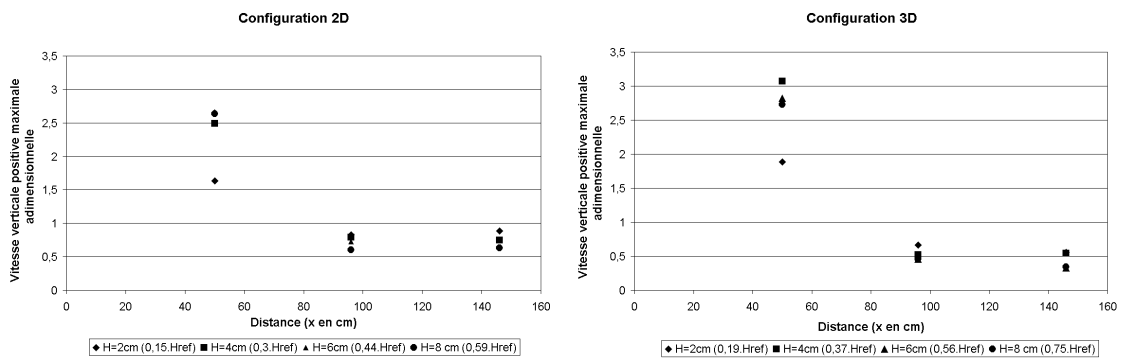


Figure 24. Rapport entre la vitesse verticale positive maximale (moyenne sur 5 essais) avec et sans obstacle en fonction de la distance pour les simulations 2D et 3D

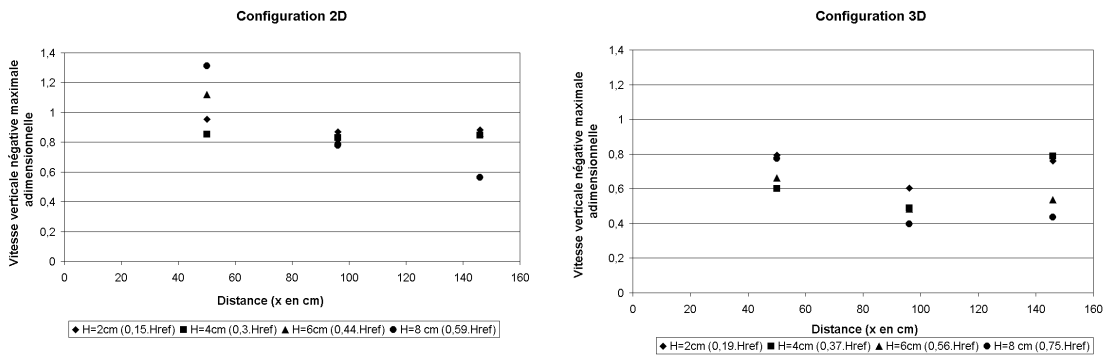


Figure 25. Rapport entre la vitesse verticale négative maximale (moyenne sur 5 essais) avec et sans obstacle en fonction de la distance pour les simulations 2D et 3D

III.4 Conclusions et développements ultérieurs

La vitesse observée à l'intérieur de la tête de l'avalanche simulée est plus grande que la vitesse du front. Ainsi pour une configuration 2D, le rapport U_{\max}/U_F peut atteindre 1.6 sachant que cette valeur dépend de la hauteur. Dans le cas d'une configuration tri-dimensionnelle, ce rapport ne diffère que très peu même si il est supérieur (jusqu'à 1.8). La vitesse verticale atteint 87% de la vitesse du front pour la simulation 3D et 66% pour la simulation 2D.

La diminution de la vitesse du front due à la présence des digues est une fonction croissante de la hauteur des digues. Mais cette diminution dépend aussi de la topographie : ainsi les digues semblent plus efficaces sur une pente ouverte (absence de canalisation du couloir). Le rapport U_{\max}/U_F est une fonction croissante de la hauteur de la digue et peut atteindre une valeur de 1.9. Il apparaît ainsi que la vitesse du front n'est pas un paramètre pertinent, même si les tendances indiquées sont correctes. Par ailleurs, la présence d'obstacles conduit à une réduction de la vitesse verticale en aval.

Dans les expérimentations en cuve, l'injection peut être continue (débit constant) ou de courte durée (volume constant). Dans ce dernier cas, le corps de l'avalanche est quasi-inexistant. Sur une pente de 10° , la vitesse maximum enregistrée au sein de la bouffée est de 1.5 fois la vitesse du front. Mais dans le cas d'un courant de gravité, il semble que ce facteur puisse atteindre 2.5. L'interaction entre courant de gravité et obstacles devra donc être étudiée.

La transposition des résultats obtenus sur maquettes à la réalité est encore sujette à interrogations. En effet, le rapport de densité n'est pas respecté. Il n'est pas possible d'étudier expérimentalement les effets de ce rapport. Ce point sera donc plus particulièrement étudié numériquement.

IV ■ CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'interaction entre les avalanches de neige et les structures de protection a été étudiée par une approche expérimentale sur modèles réduits. La méthodologie consistait à étudier l'influence d'un obstacle de géométrie simple (digue de hauteur H) sur des écoulements granulaires simulant les avalanches de neige dense d'une part, et sur des courants de gravité simulant les aérosols d'autre part. Concernant les écoulements granulaires, une loi de frottement empirique a permis de prédire les vitesses de front connaissant la hauteur de l'écoulement, la réduction de la distance d'arrêt et les pertes de vitesse de front ont été quantifiées en fonction de la hauteur de l'obstacle. Concernant les courants de gravité, les expériences ont montré que la vitesse à l'intérieur de l'avalanche pouvait être très supérieure à celle du front, la réduction de la vitesse de front due à la présence des digues a été quantifiée ainsi que l'influence de ces dernières sur le rapport de la vitesse maximale à la vitesse de front.

Le passage de l'échelle réduite à l'échelle naturelle n'est bien sûr pas évident car tous les critères de similitude ne peuvent pas être respectés simultanément. Les résultats obtenus sur les modèles réduits, en plus d'apporter de nouvelles connaissances pour le dimensionnement des ouvrages de protection paravalanche, servent aussi à la validation de modèles numériques sur des échelles réduites. Ces modèles numériques sont ensuite utilisés pour simuler des écoulements interagissant avec des obstacles à l'échelle naturelle.

V ■ REFERENCES

- [AUG 95] AUGE A., OUSSET F., MARCO O., "Effet d'une digue sur l'écoulement d'un aerosol", *Proceedings of Chamonix Symposium "The contribution of scientific research to safety with snow, ice and avalanche"*, 1995, p. 235-240.
- [BEG 90] BEGHIN P., CLOSET J.-F. "Effet d'une digue sur l'écoulement e l'avalanche poudreuse", *Note technique du Cemagref*, n°77, 1990.
- [BEG 91] BEGHIN P., OLAGNE X. "Experimental and theoretical study of the dynamics of powder snow avalanches », *Cold Regions and Technology*, n°19, 1991, p. 317-326.
- [BOZ 98] BOZHINSKIY A.N., SUKHANOV L.A. "Physical modeling of avalanches using an aerosol cloud of powder materials", *Annals of Glaciology*, vol. 26, 1998, p. 242-246.
- [CHU 95] CHU, T., HILL, G., MCCLUNG, D.M., NGUN, R., SHERKAT, R., Experiments on granular flows to predict avalanche runup, *Can. Geotech. J.*, 32, 285-295, 1995.
- [HAK 01] HÁKONARDÓTTIR, K.M., JOHANNESSEN, T., TIEFENBACHER, F., AND KERN, M. A laboratory study of the retarding effect of breaking mounds in 3, 6 and 9m long chutes. *Technical report, VEDURSTOFA ÍSLANDS*, Report No. 01007, 2001.
- [HER 91] HERMANN F., HUTTER K., "Laboratory experiments on the dynamics of powder-snow avalanches in the run-out zone", *Journal of Glaciology*, vol. 37, n° 126, 1991, p. 281-295.
- [HOP 77] HOPFINGER E.J., TOCHON-DANGUY J.-C., "A model of powder-snow avalanches", *Journal of Glaciology*, vol. 19, n°81, 1977, p. 343-3546.
- [HOP 83] HOPFINGER E.J., «Snow avalanche motion and related phenomena », *Ann Rev. Fluid Mech Vol. 15, 1983*, p. 47-76.
- [HUT 95] HUTTER, K., KOCH, T., PLÜSS, C., SAVAGE, S.B., The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout. Part II: Experiments, *Acta Mechanica*, 109, 127-165, 1995.
- [HUT 96] HUTTER K., Avalanche dynamics. *In Hydrology of disasters. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht/Boston/London*, 1996.
- [KEL 95] KELLER S. "Measurements of powder snow avalanches : Laboratory", *Surveys in Geophysics*, vol. 16, 1995, p. 661-670.
- [KEL 98] KELLER, S., ITO, Y., NISHIMURA, K., Measurements of the velocity distribution in ping-pong-ball avalanches, *Annals of Glaciology*, 26, 259-264, 1998.
- [LAN 00] Lane-Serff, Beal L.M., Hadfield T.D., "Gravity current over obstacles", *Journal of Fluid Mechanics*, 292, 2000, p. 39-53.
- [LAR 98] LARSEN, J. O., NOREM, H., The effect of dam constructions as mitigative measures. 14 years of experience from a full-scale project, *Proceedings. Kirovsk*, 59-65, 2-6 septembre 1996.
- [McC 93] McClung D., Schaerer P., „*The Avalanche Handbook*“, The Mountaineers, 1993.
- [NAA 00] CADZIE : Catastrophic Avalanches Defence Structures and Zoning in Europe EVG1-1999-00009 / Report period 01/04/2000 31/03/2001)
- [NAA 01] CADZIE : Catastrophic Avalanches Defence Structures and Zoning in Europe EVG1-1999-00009 / Report period 01/04/2001 07/06/2002)
- [NIS 95] NISHIMURA K., SANDERSEN F., KRISTENSEN K., LIED K. "Measurements of powder snow avalanche – Nature", *Surveys in Geophysics*, vol. 16, 1995, p. 649-660.
- [POU 99] POULIQUEN, O., Scaling laws in granular flows down rough inclined planes, *Phys. Fluids*, 11, 542-548, 1999.
- [POU 02] POULIQUEN, O., FORTERRE, Y., Friction law for dense granular flows: application to the motion of a mass down a rough inclined plane, *Journal of Fluid Mechanics*, 453, 133-151, 2002.