

De l'eau, du sel et des grains pour modéliser les avalanches de neige !

Florence Naaim-Bouvet¹
Thierry Faug¹

Résumé. Le document présente la modélisation physique des avalanches de neige. Les avalanches de neige poudreuse sont généralement modélisées par des solutions salines dans l'eau et les avalanches de neige denses par des avalanches granulaires. Pour les deux types d'écoulements, on présente les principales caractéristiques des écoulements naturels, les fluides modèles et les critères de similitude. Ces derniers sont basés sur l'adimensionalisation des équations régissant l'écoulement, principalement la conservation de la masse et de la quantité de mouvement. Ils permettent l'estimation des grandeurs physiques réelles telles que la vitesse, la pression, la distance d'arrêt,... à partir de mesures réalisées sur la maquette. Les limites de cette approche sont soulignées. Enfin, nous montrons un exemple d'utilisation de modèles réduits dans le cadre de l'expertise pour le dimensionnement des ouvrages paravalanches sur le site de Tacconnaz en France.

Mot clés : avalanches poudreuses, avalanches denses, modèles réduits, eau et sel, grains, similitude

Water, salt and grains in order to model snow avalanches!

Abstract. This paper presents physical modeling of snow avalanches. Powder avalanches are often modeled by density current (salt water in pure water) and dense avalanche are modeled by granular avalanches. For both types of avalanches, we remind of the main characteristics of flow and the similitude requirements : They are mainly obtained thanks to the dimensionless analysis of mass and momentum equation and have been to fulfilled to estimate real pressure, velocity, run out distance... from the small scale model. Limits of physical model approach are highlighted. Finally, we show an example of physical modeling done in the framework of passive structure design at the Tacconnaz avalanche path.

Keywords: powder avalanches, dense avalanches, small-scale models, water and salt, grains, similitude

¹ UR ETNA, Cemagref, 2 rue de la papeterie, BP 76, 38402 Saint-Martin d'Hères, FRANCE
Tel : 33-4-76-76-27-09, Email : florence.naaim@cemagref.fr
Tel : 33-4-76-76-28-28, Email : thierry.faug@cemagref.fr

1. Introduction

Compte tenu du coût des expérimentations in situ, de la sécurité, des difficultés d'accès aux sites naturels, et du fort aléa lié à la météorologie, la dynamique des avalanches n'est pas encore complètement élucidée et ce malgré les nombreux efforts déployés par la communauté scientifique. Ceci est notamment dû au manque de données expérimentales fiables.

Il est incontestable qu'il est préférable d'obtenir des informations par l'étude du phénomène à l'échelle 1 et in situ. Mais cela n'est pas toujours possible. Malgré les difficultés liées en particulier au choix du matériau modèle, les expérimentations en laboratoire restent donc une alternative intéressante : le nombre d'expériences n'est pas limité et les conditions initiales sont contrôlées.

Le principe de la modélisation physique est simple : il s'agit de reproduire le phénomène à échelle réduite sur une maquette en utilisant un matériau modèle. Le passage de la maquette à la réalité se fait par l'intermédiaire de critères de similitude obtenus par l'adimensionnalisation des équations régissant le comportement des avalanches : il s'agit principalement des équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement.

Les avalanches de neige dense et les avalanches de neige poudreuse ne se comportent pas de façon identique et leur modélisation est donc distincte avec des matériaux « modèle » différents : de l'eau salée pour les avalanches poudreuses (partie 2) et du sable, ou plus généralement des grains, pour les avalanches denses (partie 3).

La modélisation physique ne va pas sans poser de difficultés : l'obtention des critères de similitude est liée à une mise en équation des avalanches qui implique donc une certaine « vision » de l'avalanche et les critères de similitude ne peuvent être tous respectés simultanément.

Néanmoins ces expérimentations physiques, bien qu'imparfaites, permettent d'une part de mieux comprendre les processus physiques en jeu et d'autre part de créer une base de données pour la validation des approches numériques. Elles constituent également un outil pour l'ingénieur, parmi d'autres, d'aide à la conception de dispositifs de protection, comme cela a été le cas, par exemple, pour le paravalanche de Tacconnaz (partie 4).

2. Modélisation physique des avalanches de neige poudreuse

2.1. Généralités

Les avalanches aérosol sont caractérisées par une forte interaction entre l'écoulement et l'air ambiant, se traduisant par une incorporation d'air réduisant sa masse volumique. Les avalanches aérosol, formées donc de suspension de particules de glace dans l'air, se caractérisent par un écoulement turbulent composé de grandes volutes (structures

turbulentes particulièrement visibles au front), des vitesses rapides, des hauteurs d'écoulement importantes et des masses volumiques faibles. Elles n'apparaissent que sous certaines conditions (neige froide, sèche et faiblement cohésive, pente forte) sous la forme d'un nuage. C'est pourquoi on parle d'avalanche poudreuse ; cependant des exemples historiques montrent que des accumulations de neige lourde peuvent aussi créer des aérosols. L'avalanche est considérée comme une avalanche aérosol « pure » lorsque la partie dense basale est inexistante (McClung, 1993). Sous certaines conditions, la suspension poudreuse peut atteindre 1000 m de long, 500 m de large et 100 m de haut avec une densité de 2 à 5 kg.m⁻³ (Nishimura, 1995). Les vitesses peuvent atteindre 100 m.s⁻¹ et les pressions exercées sont de l'ordre de 10 à 50 10³Pa (Nishimura, 1995). Les avalanches denses provoquent des dégâts liés à leurs fortes densités alors que ceux produits par les avalanches poudreuses sont essentiellement dus aux effets de vitesse et à la turbulence. La plupart des grandes avalanches de neige sèche sont composées d'une partie dense en contact avec le lit du couloir et d'une partie poudreuse qui recouvre cette dernière (MacClung et Schaerer (1984), Nishimura et al (1995)). Ces expériences ont également montré qu'il existe une zone de transition entre ces deux couches. C'est dans cette zone intermédiaire que s'opère un important échange de masse et de quantité de mouvement entre les deux parties. C'est à travers cet échange que se forme et se développe l'avalanche poudreuse. La connaissance des processus physiques régissant cet échange n'est pas encore complètement stabilisée (fluidisation du lit ou processus de saltation) (Barbolini et al., 2009) ce qui n'est pas sans conséquence en terme de modélisation.



Figure 1 : Avalanche aérosol pleinement développée, déclenchée artificiellement, à la pointe du Dard (C. Vion)

2.2. Modélisation physique par courants et bouffées de densité

Dans le cas des avalanches de neige poudreuse, les travaux de référence sont français: les premiers expérimentateurs ont supposé négligeables et l'interaction entre les grains, et le glissement entre la phase porteuse et la phase solide « portée ». Ils se sont, dès le départ, placés dans le cas d'un écoulement fortement inertiel. Dans ce cas, la représentation de l'avalanche par une solution saline (fluide lourd) s'écoulant dans l'eau est possible, et a d'ailleurs été adoptée. Hopfinger et Tochon-Danguy (1977), et par la suite Beghin et al. (1991), ont étudié à la fois les courants longs et les bouffées de densité. 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 bouffées de densité (Beghin et al., 1991), le corps de l'avalanche est quasi-inexistant. 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. Lorsque le nombre de Reynolds est suffisamment grand, la similitude est obtenue si le nombre de Froude densimétrique (1) et le rapport de densité entre fluide lourd et fluide ambiant (2) sont respectés.

$$\frac{U}{\sqrt{gH \frac{\Delta\rho}{\rho_a}}} \quad (1)$$

$$\frac{\Delta\rho}{\rho_a} \quad (2)$$

où U est la vitesse du front, H est la hauteur de l'écoulement, $\Delta\rho$ est la densité relative de l'avalanche avec ρ densité de l'avalanche et ρ_a est la densité du fluide ambiant.

Le respect simultané des critères (1) et (2) conduit en laboratoire à des vitesses élevées et des dimensions considérables. De ce fait, le rapport de densité n'est pas respecté. Dans les expériences de laboratoire, $\Delta\rho/\rho_a$ est de l'ordre de 0,2 alors que dans le cas d'avalanches aérosol réelles, ce rapport est de l'ordre de 4 (zone d'arrêt) à 10 (zone de départ). Dans les années quatre-vingt-dix, les Suisses (Hermann et al. (1991)) ont également développé un modèle physique bi-phasique : l'avalanche de neige aérosol est ici 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. Mais là encore le rapport de densité n'est pas respecté.



Figure 2 : Bouffée de densité saline (Cemagref)

Les résultats issus des expériences réalisées avec des solutions salines ont permis de développer le premier modèle de simulation d'avalanche (Beghin et Brugnot, 1983) (Beghin et Olagne, 1991). Le dispositif expérimental utilisé au Cemagref depuis les années quatre-vingt est constitué d'une cuve vitrée d'une longueur de 4.5 m, d'une largeur de 4 m et d'une hauteur de 2 m dans laquelle les bouffées de gravité s'écoulent le long d'un plan incliné à partir d'un réservoir fermé par une vanne à ouverture instantanée. L'avalanche poudreuse est simulée par de l'eau salée mélangée avec du kaolin ou un colorant permettant de visualiser l'écoulement.

2.3. Implémentation des résultats de la modélisation physique dans un modèle mathématique simple

Un premier modèle a été proposé par Kulikovskiy et Sveshnikova (1977) puis a été modifié par Beghin (1979), Beghin et al., (1981), Beghin and Brugnot (1983), Beghin and Olagne (1991) : l'avalanche modélisée par une bouffée de densité est considérée comme un volume fini identifiable (autrement dit un bloc déformable, assimilable à une demi-ellipse). L'écoulement du fluide est gouverné par la gravité, l'incorporation du fluide ambiant, la force de frottement exercée par l'air ambiant et par le sol et la modélisation est basée sur la résolution de l'équation de la conservation de la masse et de la quantité de mouvement. Une des particularités est la prise en compte du mouvement du fluide ambiant induit par l'avalanche (ou vent d'avalanche) en considérant qu'il va à la même vitesse que l'avalanche. A partir de son origine, le couloir d'avalanche est ainsi divisé en tronçons de pente constante et les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement sont discrétisées simplement à l'aide des résultats issus des expérimentations. En effet, il a été montré expérimentalement que les coefficients de croissance du nuage en hauteur, longueur et largeur étaient des fonctions linéaires de la pente (pour des pentes supérieures à 5°-

10°) pour le cas bi-dimensionnel (Beghin et Brugnot (1983)) et tri-dimensionnel (Beghin et Olagne (1991)). Ce modèle porte généralement le nom de KSB pour Kulikovskiy-Sveshnikova-Beghin (Ancey, 2004). En France, ces résultats ont été implémentés dans un programme informatique appelé AVAER utilisé par les praticiens. Pour ces derniers, l'évaluation de la pression sur les ouvrages est fondamentale. La pression dynamique est égale à $\frac{1}{2}\rho U^2$. Mais, comme précisé par Beghin et Olagne (1991), il est difficile d'estimer la pression maximale développée par l'avalanche, car on ne connaît que très peu l'évolution verticale de la pression au sein de l'écoulement. Cependant dans un autre article, Beghin et Closet (1990) ont proposé le profil suivant :

$$K(z) \frac{1}{2}\rho U^2 \quad (3)$$

L'estimation de ce profil était basée sur des expériences réalisées par Hopfinger et Tochon-Danguy (1977) montrant que la vitesse à l'intérieur de l'avalanche pouvait être de 1,5 à 2,5 fois la vitesse du front et que la densité à proximité du sol pouvait être de 2 à 4 fois la densité moyenne, les maxima de vitesse et de densité se produisant à 0,1H. Par la suite, Rapin (1995), considérant que la vitesse à l'intérieur de l'avalanche était constante et égale à la vitesse du front, proposa une autre fonction K(z).

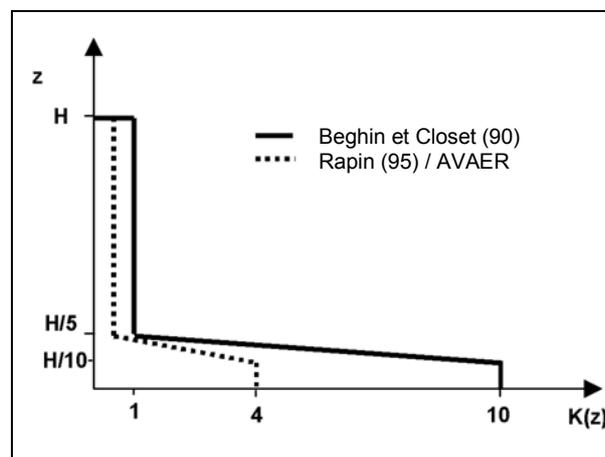


Figure 3 : Profils de pression proposés par Beghin et Closet (1990) et Rapin (1995)

2.4. Utilisation des résultats expérimentaux comme base de données pour calage de modèles numériques

Dans les années 90, des expériences similaires à celle de P. Beghin ont donc été reconduites (Naaim-Bouvet et al., 2002-a), (Naaim-Bouvet et al., 2002-b) dans le cadre de plusieurs projets européens successifs, le développement des technologies de mesures permettant de connaître la vitesse à l'intérieur de l'écoulement grâce à un vélocimètre ultra-sonique. Il a ainsi été montré que la vitesse observée à l'intérieur de la tête de l'avalanche simulée est plus grande que la vitesse du front et peut atteindre

1.6 fois la vitesse du front dans le cas d'un écoulement canalisé. Dans le cas d'une configuration tridimensionnelle, la vitesse maximale peut atteindre 1.8 fois la vitesse du front. Quant à la vitesse verticale, elle peut atteindre 87% de la vitesse du front pour la simulation 3D et 66% pour la simulation 2D. Ces fortes valeurs de la vitesse verticale au niveau du front montrent le pouvoir destructeur de l'avalanche aérosol et sa forte capacité d'arrachement des obstacles qu'elle peut rencontrer lors de son passage (arbres, pylônes ...). Par ailleurs ceci n'est pas sans conséquence sur le calcul de la pression maximale, sachant que cette dernière était jusque là calculée à partir de la vitesse de front.

Parallèlement aux modélisations physiques, une modélisation numérique des conditions de laboratoire (Naaim-Bouvet et al., 2003-a), (Sampl et al., 2004) a été effectuée permettant ainsi d'avoir accès aux profils de pressions développées dans l'avalanche de laboratoire. Dans ce cas, deux équations de conservation de la masse, une pour la solution saline et une pour le mélange solution saline et eau ont été considérées. Par contre, seule l'équation de conservation de la quantité de mouvement du mélange a été prise en considération : on fait donc l'hypothèse que la solution saline et l'eau se déplacent à la même vitesse, ce qui se justifie par le fait que la solution saline se mélange parfaitement avec l'eau. Le système est fermé par un modèle de turbulence de type $k-\varepsilon$. Les profils de pressions des simulations numériques réalisées sous FLUENT ont été extraits et comparés aux résultats obtenus par AVAER. Il apparaît ainsi que le maximum de la pression dynamique se produit effectivement à $0,1H$ mais que les hypothèses adoptées par Beghin et Closet (1990) puis Rapin (1995) conduisent à une surestimation de la pression dans la partie basse et une sous-estimation dans la partie haute, d'où l'intérêt des simulations numériques.

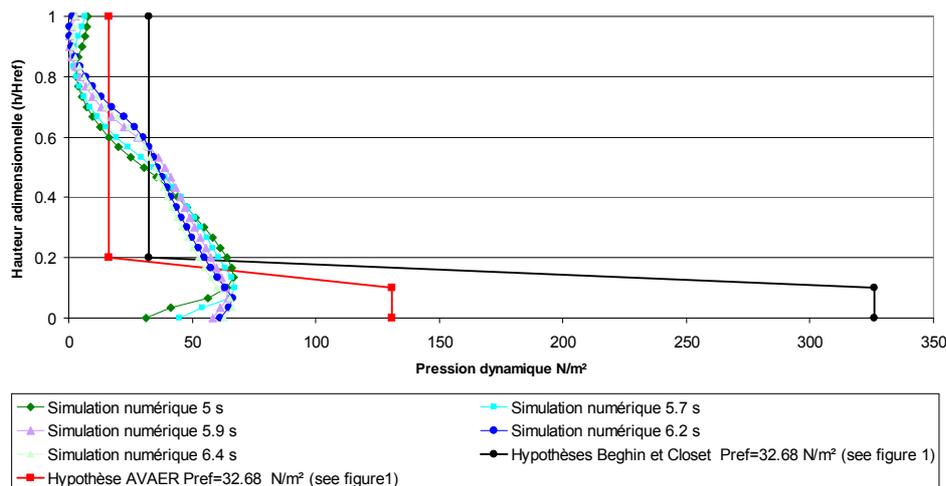


Figure 4 : Profils de pression simulés par modélisation numérique comparés aux hypothèses utilisées dans AVAER

Dans le même temps, les expériences numériques permettent de simuler des écoulements présentant des rapports de densité plus réalistes ; il est ainsi montré que

les expériences de laboratoire conduisent à des taux d'incorporation de fluide ambiant trop important (Sampl et al., 2004).

Cependant ces expériences physiques et numériques ne prennent pas en compte l'entraînement des particules au sol, entraînement qui joue un rôle fondamental dans l'évolution de la vitesse du front : dans le cas d'une bouffée de densité sans reprise de particules, on note une accélération suivie très rapidement d'une décélération. Avec l'entraînement de particules, on se trouve essentiellement dans une phase d'accélération. Un modèle (Rastello et Hopfinger, 2004) a été proposé avec des coefficients de fermeture issus d'expériences de laboratoire obtenues dans la cuve du Cemagref pour des bouffées de faible densité. Une correction est proposée pour les courants de forte densité. Dans le même temps Ancey et al. (2004) montre que les taux de croissance en hauteur largeur et longueur de l'ellipse dépendent également du

nombre de Richardson $\frac{g\Delta\rho H \cos\theta}{\rho_a U^2}$ et propose de nouvelles formulations conduisant à

des taux de croissance plus réalistes pour les avalanches réelles. La modélisation numérique proposée toujours basée sur le modèle KSB permet de considérer des écoulements avec ou sans entraînement de particules. L'auteur note cependant que pour des fortes concentrations en particules les prédictions du modèle s'éloignent des résultats expérimentaux. Une modification ultérieure (Turnbull et al., 2007) permet d'y remédier en incluant dans le modèle le volume de neige entraîné.

2.5. Les dernières modélisations physiques d'avalanches de neige poudreuse

De nouveaux dispositifs expérimentaux (Turnbull et McElwaine, 2008) permettent désormais de préserver le rapport de densité : de la neige fine et sèche est utilisée, l'écoulement débute sous forme d'un courant dense qui sur une pente raide transite vers un écoulement en suspension.

3. Modélisation physique des avalanches de neige dense

3.1. Quelques généralités sur les avalanches de neige dense

Si la densité de la neige reste voisine ou supérieure à la densité initiale du manteau neigeux, l'écoulement sera considéré comme une avalanche dense (ou avalanche coulante). Le volume des avalanches denses peut atteindre plusieurs centaines de milliers de m^3 et, dans certains cas, plusieurs millions de m^3 . Les vitesses sont comprises entre 1 et 70 $m.s^{-1}$, les hauteurs entre 1 et 20 m, et les masses volumiques entre 150 et 500 $kg.m^{-3}$. La consistance du matériau peut fortement varier selon la teneur en eau liquide (TEL) : de la neige sèche pulvérulente à la neige humide pâteuse (ressemblant à une boue) en passant par la neige granulaire constituée d'agrégats de taille et de forme diverses. Notons le cas extrême des « slush-flows » que l'on rencontre

dans les pays nordiques (par exemple : (Hestnes, 1985) (Decaulne et Saemundsson, 2006) (Jaedicke et al., 2008)) où la neige est saturée en eau. Les avalanches denses de neige sèche ont une épaisseur faible, s'écoulent vite avec une masse volumique faible (toutefois 10 à 20 fois supérieures à la masse volumique d'un aérosol) alors que les avalanches de neige humide sont plus épaisses, s'écoulent plus lentement avec des masses volumiques importantes. Les avalanches denses sont caractérisées par un profil de vitesse quasi-constant dans la hauteur, ce qui signifie que le cisaillement est principalement localisé à la base. Le cisaillement dans le corps de l'avalanche est généralement d'un ordre de grandeur plus petit que le cisaillement à la base (Bouchet et al., 2003). Si nous considérons la densité constante dans l'épaisseur, la pression dynamique est quasiment constante dans la hauteur de l'avalanche, ce qui conduit à des forces importantes et à un pouvoir particulièrement destructeur.



Figure 5 : Photographies de dépôts d'avalanches de neige dense (Source : Cemagref).

Le caractère granulaire des dépôts de neige est bien visible.

3.2. Les avalanches de neige granulaires

L'observation visuelle des avalanches denses en écoulement (Dent et al., 1998) et de leurs dépôts (Bartelt et McArdell, 2009) montre une structure granulaire des avalanches de neige dense. Outre ces observations, des similitudes de comportement évidentes entre la neige en écoulement et les fluides granulaires ont été récemment démontrées. D'abord, comme pour les matériaux granulaires (GDRMiDi, 2004), il existe une large gamme de pente pour laquelle des écoulements de neige dense peuvent être observés en régime permanent et uniforme (Rognon et al., 2008). Comme cela a déjà été mentionné précédemment, le profil de vitesse dans la hauteur des écoulements de neige est bi-cisaillé (Dent et al., 1998) (Bouchet et al., 2003) (Rognon et al., 2008). C'est également un comportement typique des fluides granulaires bi-disperses, une couche faiblement cisaillée constituée de gros grains surmontant une couche fortement cisaillée constituée de grains plus petits (Rognon et al., 2007). Enfin, il a été récemment mesuré que la variation de la hauteur de neige laissée par les queues d'avalanches en

fonction de la pente (Sovilla et al., 2010) a un comportement similaire à celui observé avec les écoulements granulaires (Pouliquen, 1999).

3.3. Principe des modèles réduits

Les modèles réduits de laboratoire actuellement utilisés pour modéliser les avalanches de neige denses sont basés sur les critères de similitudes géométrique et dynamique de l'écoulement. Ces critères sont dérivés des équations moyennées dans l'épaisseur et brièvement décrites dans la partie suivante. Sur la base de l'échelle géométrique choisie, la similitude géométrique consiste à choisir le volume d'avalanche approprié et à conserver la pente de la zone d'arrêt entre modèle réduit et réalité. Quant à la similitude dynamique, elle impose de conserver (i) le nombre de Froude Fr de l'écoulement à l'entrée de la zone d'arrêt et (ii) la différence entre la tangente de l'angle de pente ($\tan\theta$) et le coefficient de frottement effectif dans la zone d'arrêt (μ_0). Le carré du nombre de Froude peut être défini comme le rapport de l'énergie cinétique de l'avalanche (proportionnelle au carré de sa vitesse u) à son énergie potentielle (proportionnelle à la hauteur h multipliée par la gravité g) : $Fr = u/(gh)^{1/2}$. En pratique, la condition (i) est obtenue à l'aide d'un canal incliné (alimenté par un réservoir pour stocker le matériau) à pente forte dont on ajuste la pente de manière à obtenir le nombre de Froude souhaité à la sortie de la zone d'écoulement le volume étant fixé par ailleurs). Pour la condition (ii), le volume, la pente de la zone d'arrêt et le nombre de Froude étant fixés au préalable, il s'agit de trouver le bon matériau permettant de reproduire correctement la distance d'arrêt maximale observée ou correspondant à l'évènement susceptible de se produire (avalanche de projet). Cette distance d'arrêt est directement proportionnelle à la différence $\tan\theta - \mu_0$. Ce sont les matériaux granulaires secs qui sont utilisés car ils correspondent bien à la neige dense sèche et froide, cette dernière conduisant généralement aux avalanches majeures. Il faut noter que, à l'heure actuelle, les modèles physiques étudiés ne prennent pas en compte les phénomènes de reprise de la neige dans la pente. Jusqu'à présent, ce sont des matériaux granulaires secs mono-disperses ou à granulométrie peu étendue (billes, sable) qui ont été le plus souvent étudiés (par exemple : (Chu et al., 1995) (Tai et al., 2001) (Hakonardottir et al., 2004) (Faug et al., 2004) (Pudasaini et Hutter, 2007)). Les résultats récents obtenus sur la neige dense en écoulement, décrits plus haut, sur la structuration de l'écoulement en deux couches, tendent à montrer que les matériaux granulaires bi-disperses sont de meilleurs candidats pour modéliser les avalanches de neige de manière plus réaliste. C'est le choix qui a été fait, et qui s'est révélé très pertinent, pour l'étude en modèle réduit du paravalanche de Tacconnaz (Cf. partie 4). Cette étude a montré qu'un matériau granulaire bi-disperse, consistant en un mélange de billes de verre de diamètre 1 mm et de billes de PVC de diamètre 100 μm (particules fines), avec une concentration en particules fines de l'ordre de 10%, permettait de

reproduire de manière plus fidèle les avalanches sur le paravalanche de Taconnaz (Naaim et al., 2010). Les matériaux bi-disperses sont aujourd'hui étudiés pour simuler les avalanches de neige denses (Moro et al., 2010).



Figure 6 : Photographies d'une avalanches de grains en interaction avec un obstacle de type digue sur le bi-plan incliné du Cemagref de Grenoble (Source : Cemagref, photo T. Faug). Les grains utilisés ici sont des billes de verre de diamètre 1 mm.

3.4. Une brève introduction aux équations moyennées dans l'épaisseur

Les équations moyennées dans l'épaisseur ont été initialement introduites en France, par Barré de Saint-Venant (1871) pour décrire les écoulements dans les rivières. Ces équations sont basées sur les conservations de la masse et de la quantité de mouvement intégrées dans l'épaisseur de l'écoulement. Grâce à l'hypothèse de « couche mince », consistant à considérer que les variations typiques de hauteur sont très faibles devant les variations longitudinales (ce qui est le cas des rivières mais aussi de la plupart des écoulements géophysiques dont font partie les avalanches de neige), on peut faire abstraction de ce qui se passe à l'intérieur du matériau en écoulement et simplement décrire la déformation (dans le temps et dans l'espace) du volume de fluide en écoulement par l'équilibre entre les forces d'accélération, la force de gravité, la force de gradient de pression (liée aux variations de hauteur) et la force de frottement à la base. Cette force de frottement est généralement considérée comme égale au produit du poids de l'écoulement par un coefficient de frottement. Ce dernier contient l'information concernant la rhéologie du fluide en écoulement. Le formalisme de Saint-Venant a été appliqué aux avalanches granulaires (Savage et Hutter, 1989) (Pouliquen

et Forterre, 2002) et également au cas des avalanches de neige (par exemple : (Naaim et al., 2003) (Zwinger et al., 2003) (De Toni et Scotton, 2004)). La normalisation de ces équations permet de faire apparaître les critères de similitude dynamique décrits dans la partie précédente : (i) le nombre de Froude, Fr , et (ii) la différence entre l'angle de pente et l'angle de frottement, $\tan\theta - \mu_0$ (μ_0 étant le coefficient de frottement à l'arrêt de l'avalanche donc à vitesse nulle). En fonction du degré de complexité de la loi choisie pour décrire le frottement de la neige (constant, de type loi de Voellmy ou correspondant à des comportements plus complexes inspirés de la rhéologie des fluides granulaires), on pourra faire apparaître d'autres nombres sans dimension donc d'autres critères de similitude.

3.5. Limites et apport des modèles réduits avec des fluides granulaires

Le passage du terrain au laboratoire implique le choix d'un matériau modèle pour simuler les avalanches de neige denses. Nous avons vu que les fluides granulaires denses présentent des analogies de comportement avec la neige dense. Dans le cadre formel des équations moyennées dans l'épaisseur, il est possible de dériver les principaux critères de similitude gouvernant la dynamique des avalanches qu'elles soient granulaires en laboratoire ou de neige sur le terrain. C'est sur cette base que sont mis en place les modèles réduits de laboratoire et que le choix du matériau granulaire modèle est fait. Cependant, il faut garder à l'esprit que ces modèles réduits ainsi que la description de Saint-Venant ne sont qu'une représentation de la réalité et présentent donc leurs limites. Les modèles réduits permettent d'étudier en détail un processus physique grâce au contrôle et la répétitivité des conditions expérimentales, par exemple le problème de la réduction de la distance d'arrêt en aval d'une digue (Faug et al. 2004) ou encore celui de la force des avalanches (Caccamo et al., 2010). Cependant, afin d'être validées pour l'échelle 1, les connaissances obtenues en modèles réduits doivent être confrontées avec soin aux données de terrain bien documentées quand cela est possible (Faug et al., 2008) (Faug et al., 2010). Les modèles réduits constituent, pour l'ingénieur, un outil supplémentaire en plus du savoir de terrain, des calculs analytiques et de la modélisation numérique. Comme on le verra dans la partie suivante, le modèle réduit, complété par les approches précitées, peut s'avérer très pertinent pour prédéfinir les forme, taille et position optimales d'ouvrages paravalanches (Naaim et al., 2010).

4. Un exemple d'étude de cas : Le paravalanche de Taconnaz (Naaim et al., 2010)

Le couloir d'avalanche de Taconnaz est situé dans la haute vallée de l'Arve, à proximité du Mont-Blanc (France). Tout au long du siècle dernier, plusieurs avalanches denses et mixtes, de grande ampleur, ont pris place dans ce couloir et ont atteint les zones habitées à plusieurs reprises. La surface de la zone de départ, la longueur et le dénivelé de ce couloir sont hors norme. Le couloir d'avalanche de Taconnaz a une longueur de 7 km, une pente moyenne de 25°, et une largeur moyenne comprise entre 300 et 400 m avec 3 zones de départ identifiées dont l'une démarre à 4000 m. L'avalanche peut être déclenchée par une chute de séracs et la pente de la zone d'arrêt reste relativement élevée avec 13°.

En février 1999, une avalanche mixte a débordé le système de défense construit en 1991 sur le couloir d'avalanche de Taconnaz (Haute-Savoie), montrant les limites des ouvrages mis en place en 1991, en particulier contre les avalanches rapides de neige sèche. Les communes locales ont décidé de procéder à l'amélioration du dispositif paravalanche. Pour le dimensionnement du système de défense, les deux types d'écoulement – dense et poudreux – doivent être considérés. Le dispositif doit retenir les avalanches denses jusqu'à l'événement centennal, et il doit réduire la pression développée par l'écoulement en aérosol. A ces fins, le Cemagref a été chargé par le SIVOM de la haute vallée de l'Arve (i) de prédéterminer l'aléa dû aux avalanches de neige denses en entrée du système de protection, pour dimensionner la meilleure combinaison d'ouvrages de protection capables d'étaler, dissiper l'énergie et retenir l'avalanche dense de référence, et (ii) d'analyser le risque résiduel dû à la partie poudreuse de l'écoulement. Toutes les données historiques ont été rétro-analysées à l'aide d'un modèle numérique de propagation des avalanches. Les valeurs retenues pour l'événement centennal sont 3.58 pour le nombre de Froude et 1.6 Mm³ pour le volume. Les modélisations physique et numérique des avalanches denses interagissant avec les ouvrages de protection ont été combinées afin de dimensionner le système de défense le plus efficace. Finalement, les modélisations physique et numérique de l'interaction de l'avalanche en aérosol avec le système de défense ont été conduites pour montrer que les améliorations proposées n'accroissent pas le risque résiduel dû à l'écoulement de neige poudreuse en aval des ouvrages.



Figure 7 : Modèle réduit en laboratoire de la zone d'arrêt inclinée à 13° et alimentée en matériau granulaire à l'aide d'un canal de pente ajustable (source : Cemagref)



Figure 8 : Dépôts obtenus par les expériences en modèle réduit (Source : Cemagref)



Figure 9 : Simulation en bassin noyé de l'interaction entre une avalanche de neige poudreuse et la digue frontale (du type de celle de Taconnaz)

Seules, les modélisations physiques n'auraient pas permis de répondre à la question posée, mais en combinaison avec une approche numérique, et en l'état actuel des connaissances elles ont contribué à un dimensionnement des ouvrages de protection adapté.

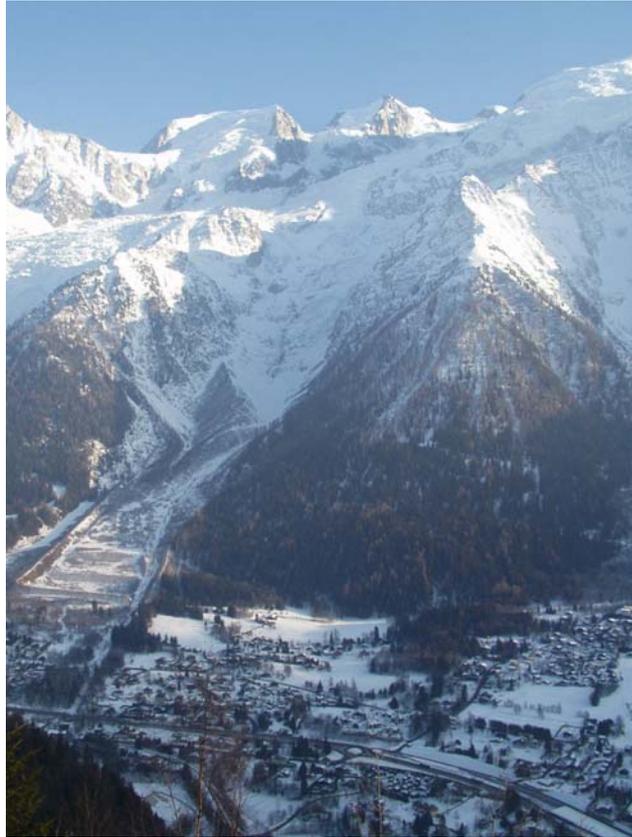


Figure 10 : Couloir de Taconnaz et dispositif de protection conçu en 1999



Figure 11 : Couloir de Taconnaz et travaux de construction du nouveau dispositif – Août 2010
(R. Burnet)

Bibliographie

- [1] BARBOLINI, M., DOMAAS, U., FAUG, T., GAUER, P., HAKONARDOTTIR, K. M., HARBITZ, C. B., ISSLER, D., JOHANESSON, T., LIED, K., NAAIM, M., NAAIM BOUVET, F., RAMMER, L. 2009. The design of avalanche protection dams Recent practical and theoretical developments. EUROPEAN COMMISSION, Climate Change and Environmental Risks, 212 p.
- [2] BARTELT, P.; MCARDELL, B.W., Instruments and Methods: Granulometric investigations of snow avalanches. *Journal of Glaciology*. 55(193), 829-833, 2010.
- [3] BEGHIN, P., Etude des bouffées bidimensionnelles de densité en écoulement sur pente avec application aux avalanches de neige poudreuse, Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 1979.
- [4] BEGHIN, P., HOPFINGER, E.J., BRITTER, R.E., Gravitational convection from instantaneous sources on inclined boundaries, *Journal of Fluid Mechanics*, 107, 402-422.
- [5] BEGHIN, P. AND CLOSET, J.-F.: Effet d'une digue sur l'écoulement d'une avalanche poudreuse, Note technique du Cemagref, no. 77, Grenoble, 1990.
- [6] BEGHIN P. AND OLAGNE X.: Experimental and theoretical study of the dynamics of powder snow avalanches, *Cold Regions and Technology*, 19, 317-326, 1991.
- [7] BOUCHET A., NAAIM M., OUSSET F., BELLOT H., CAUVARD D., Experimental determination of constitutive equations for dense and dry avalanches: presentation of the set-up and first results, *Surveys in geophysics*, vol. 24, p. 525-541, 2003.
- [8] CACCAMO P., CHANUT B., FAUG T., BELLOT H., NAAIM-BOUVET F., Small-scale laboratory tests on granular avalanches overflowing a flat obstacle: flow regimes, dead zone and induced forces. Proceedings of the EPFL Doctoral Conference in Mechanics, 2010.
- [9] CHU T., HILL G., MCCLUNG D.M., NGUN R., SHERKAT R., Experiments on granular flows to predict avalanche run-up, *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 32, p. 285-295, 1995.
- [10] DECAULNE, A, SAEMUNDSSON, P., Meteorological conditions during slush-flow release and their geomorphological impact in Northwestern Iceland : A case study from the Bíldudalur valley, *Geografiska annaler. Series A. Physical geography*, 88 (3), 187-197, 2006.
- [11] DENT, J. D., BURREL, K. J., SCHMIDT, D. S., LOUGE, M. Y., ADAMS, E. E., AND JAZBUTIS, T. G., Density, Velocity and Friction Measurements in a Dry-Snow Avalanche, *Annals of Glaciology*, 26, 247, 1998.
- [12] DE TONI S., SCOTTON P., Two-dimensional mathematical and numerical model for the dynamics of granular avalanches, *Cold Regions Science and Technology*, vol. 43 (1-2), p. 36-48, 2005.
- [13] FAUG T., *Simulation sur modèle réduit de l'influence d'un obstacle sur un écoulement à surface libre. Application aux ouvrages de protection contre les avalanches de neige*, Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble I, 2004.
- [14] FAUG T., GAUER P., LIED K., NAAIM M., Overrun length of avalanches overtopping catching dams: cross-comparison of small-scale laboratory experiments and observations, *Journal of Geophysical Research*, vol. 113, F03009, 2008.
- [15] FAUG T., CHANUT B., BEGUIN R., NAAIM, M., THIBERT E., BAROUDI D., A simple analytical model for avalanche-induced pressure on obstacles, *Annals of Glaciology* 51 (54), 1-8, 2010.
- [16] GDR MIDI, On dense granular flows, *E. Phys. J. E* 14 367-371 (2004)
- [17] HÁKONARDÓTTIR K.M., *The interaction between snow avalanches and dams*, PhD thesis, Bristol University, 2004.

- [18] HERMANN, F. AND HUTTER, K.: Laboratory experiments on the dynamics of powder-snow avalanches in the run-out zone, *J. of Glaciology*, 37, 126, 281–295, 1991.
- [19] HESTNES, E., A contribution to the prediction of slush avalanches, *Annals of Glaciology*, 6, 1-4, 1985.
- [20] HOPFINGER, E. J. AND TOCHON-DANGUY, J.-C.: A model of powder-snow avalanches, *J. of Glaciology*, 19, 81, 343–356, 1977.
- [21] HOPFINGER, E. J.: Snow avalanche motion and related phenomena, *Ann Rev. Fluid Mech.*, 15, 47–76, 1983.
- [22] JAEDICKE, C., KERN, M. GAUER, P., BAILLIFARD, M.A., PLATZER, K., Chute experiments on slushflow dynamics, *Cold Regions Science and Technology*, 51(2-3), 156-157, 2008.
- [23] KELLER, S.: Measurements of powder snow avalanches: Laboratory, *Surveys in Geophysics*, 16, 661–670, 1995.
- [24] KELLER, S. AND ISSLER, D.: Staublawinen über Dämme und Mauern im Labor; Zusammenstellung aller Resultate und Auswertung, Internal report of the Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche, Research no. 697, Davos (Switzerland), April, 1996.
- [25] KULIKOVSKIY, A.G., SVESHNIKOVA, E.I., A model for computing powdered snow avalanche motion (in Russia), *Data Glaciolog. Stud.*, 31, p. 74-80.
- [26] MCCLUNG, D. AND SCHAEERER, P.: *The Avalanche Handbook*, The Mountaineers, Seattle, 1993.
- [27] MORO, F., FAUG, T., BELLOT, H., OUSSET, F., Large mobility of dry snow avalanches: insights from small-scale laboratory tests on granular avalanches of bidisperse materials, *Cold Regions Science and Technology*, 62, 55-66 2010.
- [28] NAAIM M., FAUG T., NAAIM-BOUVET F., Dry granular flow modelling including erosion and deposition, *Surveys in Geophysics*, vol. 24 (5-6), p. 569–585, 2003.
- [29] NAAIM, M., FAUG, T., NAAIM, F., ECKERT, N., 2010, Return period calculation and passive structure design at Tacconnaz avalanche path, France. *Annals of Glaciology* 51(54), p. 89-97.
- [30] NAAIM BOUVET, F., NAAIM, M., BACHER, M., HEILIGENSTEIN, L. - 2002. Physical modelling of the interaction between powder avalanches and defence structures. *Natural hazards and earth system sciences*, vol. 2, p. 193 – 202.
- [31] NAAIM BOUVET, F., PAIN, S., NAAIM, M., FAUG, T. - 2003. Numerical and physical modelling of the effect of a dam on powder avalanche motion: comparison with previous approaches. *Surveys in geophysics*, vol. 24, p. 479 - 498
- [32] NISHIMURA, K., SANDERSEN, F., KRISTENSEN, K., AND LIED, K.: Measurements of powder snow avalanche – Nature, *Surveys in Geophysics*, 16 649–660, 1995.
- POULIQUEN, O. Scaling laws in granular flows down rough inclined planes, *Phys. Fluids*, 11, 542-548, 1999.
- [33] 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.
- [34] PRIMUS, M., NAAIM BOUVET, F., NAAIM, M., FAUG, T. - 2004. Physical modeling of the interaction between mounds or deflecting dams and powder snow avalanches. *Cold region science and technology*, vol. 39, p. 257 – 267.
- [35] PUDASAINI S., HUTTER K. *Avalanche dynamics: dynamics of rapid flows of dense granular avalanches*, Springer, 2007.
- [36] RAPIN F., 1995, «The French theory for the snow avalanches with aerosol», Université européenne d'été sur les risques naturels, Université européenne d'été sur les risques naturels "neige et Avalanches", Chamonix, 14-25 Septembre 1992, Editions Cemagref, p. 149-154.

- [37] RASTELLO, M., HOPFINGER, E. - 2004. Sediment-entraining suspension clouds: a model of powder-snow avalanches. *Journal of fluid mechanics*, vol. 509, p. 181 – 206.
- [38] ROGNON P.G., ROUX J.-N., NAAIM, M., CHEVOIR F., Dense flows of bidisperse assemblies of disks down an inclined plane, *Physics of Fluids*, vol. 19 (5), 058101, 2007.
- [39] ROGNON P.G., CHEVOIR F., BELLOT H., OUSSET F., NAAIM M., COUSSOT P., Rheology of dense snow flows: Inferences from steady state chute-flow experiments, *Journal of Rheology*, vol. 52 (3), p. 729-748, 2008.
- [40] SAMPL, P., NAAIM BOUVET, F., NAAIM, M. - 2004. Interaction between dams and powder avalanches: determination of simple friction laws for shallow water avalanche models. *Cold region science and technology*, vol. 39, p. 115 – 131.
- [41] SAVAGE SB, HUTTER K., The motion of a finite mass of granular material down a rough incline, *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 199, p. 177-215, 1989.
- [42] SOVILLA, B., MCELWAINE, J.N., SCHAEER, M., VALLET, J., Variation of deposition depth with slope angle in snow avalanches: Measurements from Vallée de la Sionne. *J. Geophys. Res.* 115, F02016, 2010.
- [43] TAI Y.C., GRAY J.M.N.T., HUTTER K., NOELLE S, Flow of dense avalanches past obstructions, *Annals of Glaciology*, vol. 32, p. 281-284, 2001.
- [44] TURNBULL, B. , MCELWAINE, J.N., ANCEY, C. – 2007. Kulikovskiy - Sveshnikova - Beghin model of power snow avalanches: Development and application. *Journal of Geophysical Research F: Earth Surface*, Volume 112, Issue 1. art. no. F01004.
- [45] TURNBULL, B. , MCELWAINE, J.N. – 2008. Experiments on the non-Boussinesq flow of self-igniting suspension currents on a steep open slope, *Journal of Geophysical Research F: Earth Surface* , Volume 113, Issue 1, 24 March 2008, Article number F01003
- [46] ZWINGER T., KLUWICK A., SAMPL P., Numerical simulation of dry-snow avalanche flow over natural terrain, *Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics*, 11, p. 109-160. In K. Hutter N. Kirchner (Eds.) *Dynamic response of granular and porous materials under large and catastrophic deformations* Springer Heidelberg, 2003