Conception des ouvrages de défense passive vis-à-vis des avalanches de neige sèche

T. Faug[1], F. Naaim[1], M. Naaim[1], K.M. Hákonardóttir[2], T. Jóhannesson[2], M. Kern[3], , P. Sampl[5], F. Tiefenbacher[3]

[1]Cemagref
2 rue de la Papeterie
BP 76
38402 Saint-Martin d'Hères / France

[2]IMO/ Icelandic Meteorological Office
Bústaðavegur 9
IS-150 Reykjavík / Iceland

[3]EISLF/ Swiss Federal Institute for Snow and Avalanche Research
Flüelastrasse 11
CH-7260 Davos Dorf / Switzerland

[5]AVL List GmbH
Hans-List-Platz 1
A-8020 Graz / Austria

Le projet CADZIE (1999-2003) :
Catastrophic Avalanche: Defense Structures and Zoning In Europe

En Europe, la prévention des avalanches s'appuie sur deux grandes démarches: la cartographie (ou "zonage") des secteurs exposés, et la construction de structures de protection permettant de stopper, de dévier ou contenir leur écoulement. Les partenaires du projet Cadzie (ETNA-Cemagref (France) / Norwegian Geotechnical Institute (Norvège) / Icelandic Meteorological Office (Islande) /Università degli Studi di Pavia, Dipartimento di Ingegneria Idraulica Ambiantale (Italie) / Institut für Lawinen und Wilbachforschung (Autriche) / Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape (Suisse) / Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (France) / AVL List GMBH Graz (Autriche)) se sont employés à explorer simultanément ces deux domaines en vue d'améliorer les méthodes de prévention.

Zonage des avalanches

Traditionnellement, le "zonage" des avalanches est entièrement basé sur l'observation des traces laissées par les coulées précédentes et les souvenirs de la population locale. Cette approche ne prend pas en compte les multiples variables pouvant affecter l'impact d'une avalanche, telles que l'épaisseur et la qualité de la neige, les conditions climatiques et l'existence de barrières naturelles ou érigées par l'homme. Un grand nombre d'influences doit donc être pris en considération. Dans ce contexte, il a été nécessaire d'analyser la sensibilité, la fiabilité et les incertitudes des résultats. Les recherches se sont portées sur les points suivants:
(i) le choix d'outils de zonage intégrant les dernières avancées en termes de modélisation, la détermination de leur domaine de validité et l'optimisation de leur paramètres de calage, (ii) la description de la sensibilité et l'incertitude des résultats, (iii) la combinaison des données historiques, des méthodes statistiques et des outils dynamiques de simulation et enfin (iv) l'intégration de ces nouvelles connaissances pour développer une approche intégrée de zonage de l'aléa avalanche. Ce travail a pu être mené à bien car chacun des partenaires associés au projet a fourni suffisamment de données historiques bien documentées, qui ont été au préalable rassemblées dans une base de données commune.

Dispositif de protection

Le second volet du projet a porté sur l'étude des effets des obstacles de protection sur les écoulements d'avalanches. La conception des ouvrages de protection, du point de vue de leur effet sur l'écoulement, était jusqu'alors essentiellement empirique. Par conséquent, les différents partenaires se sont employés à développer un cadre théorique et expérimental permettant l'étude des interactions des avalanches avec des structures de protection afin de parvenir à une évaluation quantitative de leurs effets. Cette étude a notamment nécessité les simulations numérique et physique des écoulements autour de différents dispositifs de protection. Cette approche a ainsi permis la formulation de lois physiques permettant de représenter les effets escomptés sur les écoulements.

La tâche finale de l'équipe a consisté à diffuser les résultats obtenus et les outils élaborés dans le cadre du projet auprès des ingénieurs et des autorités locales et nationales. Le document suivant correspond **à la traduction française et à la mise à jour** du guide de conception des ouvrages de défense passive élaboré conjointement.

Sommaire

1. INTRODUCTION 5

1 LES OUVRAGES DE PROTECTION PASSIVE 5

1.1 Les digues d'arrêt 6

1.2 Les digues déflectrices 9

1.3 Tas freineurs et dents freineuses 10

1.4 Critères de conception traditionnels des dispositifs de protection dans les zones d'arrêt d'avalanche 11
1.4.1 Digue d'arrêt 11
1.4.2 Digues déflectrices 12
1.4.3 Les tas freineurs 12

2 INFLUENCE DU TRANSPORT EOLIEN DE LA NEIGE AU NIVEAU DES DIGUES D'ARRET ET DES TAS FREINEURS 12

2.1 Principes de la modélisation physique et limite d'utilisation d'une telle approche 13

2.2 Comparaison entre les différents types d'ouvrages de défense passive 14
2.2.1 Dispositif expérimental 14
2.2.2 Résultats obtenus 18

3 AVALANCHE DE NEIGE DENSE ET DISPOSITIFS DE PROTECTION 19

3.1 Modèle réduits expérimentaux, outils et méthodes 19

3.2 Résultats des modèles réduits 20
3.2.1 Effets locaux 20
3.2.1.1 Régimes d'interaction écoulement / obstacle 20
3.2.1.2 Longueur de jet 21
3.2.1.3 Longueur de dépôt à l'amont 24
3.2.2 Effet global 25
3.2.2.1 Effet d'une digue verticale débordée sur la réduction de la distance d'arrêt 25
3.2.2.2 Tas freineurs et comparaison avec les digues 31

3.3 Limitations des résultats issus des modèles réduits 34

3.4 Exemple d'application de modèles numériques 34
3.4.1 Introduction 34
3.4.2 Exemple de Taconnaz 35

4 AVALANCHE DE NEIGE POUDREUSE ET DISPOSITIFS DE PROTECTION PASSIVE PERMANENTE 38

4.1 Modélisation physique 38
4.1.1 Les différentes approches et les critères de similitude correspondants. 38
4.1.2 Dispositif expérimental, instrumentation associée et critères de similitude 39
4.1.3 Principaux résultats 41

4.2 Modélisation numérique 51
4.2.1 Equations régissant le modèle 51
4.2.2 Evaluation qualitative de la protection assurée par des obstacles de différentes hauteurs 51
4.2.3 Définition des coefficients de perte de charge locale c_R et d'incorporation locale du fluide ambiant c_E 54
4.2.4 Détermination des coefficients de perte de charge c_R et d'incorporation locale du fluide c_E à partir des simulations numériques 56
4.2.5 Exemples d'application 58
Exemple 1: Intégration de l'effet d'un obstacle dans un modèle 1D de type Saint-Venant 58
Exemple 2: Intégration de l'effet d'un obstacle dans un modèle 2D de type Saint-Venant 59

5 REFERENCES 60

1. Introduction

L'un des objectifs principaux du projet CADZIE a été d'améliorer l'appréciation de la réduction du risque d'avalanche en quantifiant les effets des dispositifs de défense passive. Jusqu'alors peu de tentatives avaient été effectuées dans cette direction. Au sein de ce projet, le comportement des écoulements autour des obstacles a été abordés pour différents types d'avalanches et à différentes échelles afin d'identifier, comprendre et quantifier les processus physiques en jeu.

A l'échelle locale, les écoulements autour des obstacles ont été finement analysés en utilisant des modèles physiques et numériques. Les différentes phases (impact, déformation, dépôt, jet et choc avec le sol) ont été analysées. Pour une avalanche donnée, la structure de protection a deux effets principaux :
- La quantité de mouvement de l'avalanche est réduite (i) par la force de résistance que l'ouvrage oppose à l'écoulement et (ii) par l'impact au sol du jet qui se forme à l'aval de l'obstacle.
- Dans l'écoulement du jet qui se forme à l'aval, l'interaction avec l'air engendre une incorporation forte de l'air à l'intérieur du jet. Ce phénomène réduit la vitesse de l'avalanche car sa masse augmente et sa quantité de mouvement reste au mieux constante.

Pour une avalanche dense, il y a toutefois la formation d'un dépôt à l'amont, ce qui réduit de fait la quantité de mouvement puisque de la masse est prélevée. Cependant ce prélèvement n'affecte pas de façon significative la vitesse.

A une échelle plus globale, la distance d'arrêt pour les avalanches denses et la modification du profil de pression pour les avalanches poudreuses ont été étudiées.

La modélisation des avalanches denses a été effectuée avec des matériaux granulaires non cohésifs et certaines expériences ont été réalisées avec de la neige sèche. Quant aux avalanches de neige poudreuse, elles ont été modélisées par des bouffées de densité. Ceci entraine donc un certain nombre de limitations pour l'exploitation des résultats, limitations que doit garder à l'esprit le lecteur : ainsi pour les avalaches de neige dense, les résultats ne peuvent s'appliquer qu'aux avalanches sèches et non-cohésives, dont font partie les avalanches dites catastrophiques. En effet, certains paramètres propres aux matériaux granulaires secs sont directement utilisés pour les avalanches. Et ceci n'est valide que si la partie dense de l'avalanche est constituée de neige sèche et froide.

Enfin, les dépôts générés par du transport de neige par le vent autour des ouvrages de protection passive ont été étudiés au moyen de modélisations physiques en soufflerie.

Cette version du guide de conception des ouvrages de protection passive doit être considérée comme une première étape même si elle contient la totalité des résultats obtenus dans le cadre de CADZIE. Une seconde version prenant en compte les résultats du projet SATSIE (2003-2006) est en cours d'élaboration.

1 Les ouvrages de protection passive

Les solutions de protection paravalanche collective peuvent se présenter suivant deux stratégies interdépendantes :

➔ la **durée de la protection** entreprise avec :
- ► la défense **permanente**, qui met en œuvre des techniques opérationnelles sans intervention humaine ; elle tend à protéger pendant un temps (une durée) prolongé, au moins un hiver ;
- ► la défense **temporaire**, qui met en œuvre des techniques nécessitant l'observation préalable des conditions nivo-météorologiques et impliquant, par conséquent, une prise de décision humaine ; elle tend à protéger pendant un temps limité lors de forts risques ;

➔ le **point d'intervention** sur l'avalanche avec :
- ► la défense **passive**, qui vise à maîtriser, à modifier ou à détecter l'écoulement de l'avalanche ;
- ► la défense **active**, qui vise à maîtriser, à modifier ou à détecter les conditions de départ de l'avalanche.

Protection	**Permanente**	**Temporaire**
Passive	► Déviation : **galerie**, tremplin, **tourne**, digue, étrave ► Freinage : tas, dent, obstacle ajouré ► Arrêt : mur, digue (stockage : plage de dépôt) ► **Adaptation**, renforcement des constructions au site/phénomène ; esquive ► Avertissement, alerte : signalisation, D.R.A. (détecteur routier d'avalanche) 	► Réglementation : **interdiction**, évacuation, consigne 
Active	► Modification de la rugosité du sol : **banquette** (étroite), fauchage, drainage ► Reboisement : plantation ► Fixation et soutien du manteau neigeux : **râtelier, claie, filet** ► Utilisation de l'action du vent : **barrière à neige**, virevent, toit-buse 	► Damage ► **Déclenchement artificiel** ▫ avec les skis ▫ à l'explosif : à la main, hélicoptère, avalancheur, CATEX, (canon) ▫ au gaz : GAZEX, AVALHEX 

Les digues déflectrices, les digues d'arrêt et les tas freineurs qui agissent dans la zone d'arrêt et d'écoulement et qui visent à ralentir, arrêter ou dévier l'écoulement avant que ce dernier n'atteigne les zones à protéger constituent des dispositifs de protection permanente passive. Ce sont ces dispositifs permanents passifs qui seront considérés dans la suite du guide de conception. D'autres dispositifs permanents et passifs tels que le zonage, le DRA (détecteur routier d'avalanche) ou le renforcement des constructions ne sont pas pris en compte dans ce guide.

1.1 Les digues d'arrêt

La digue d'arrêt est une élévation en terre, en terre armée, en pierre, en béton, construit dans la zone d'arrêt, perpendiculairement à la direction de l'écoulement (Figure 1 et Figure 2). Le but est de tenter d'arrêter la fin de l'écoulement avant qu'il n'ait atteint l'objectif à protéger. Une partie de la hauteur nécessaire pour stopper l'écoulement est proportionnelle au carré de la vitesse de l'avalanche. Les hauteurs nécessaires sont donc généralement élevées c'est pourquoi la digue doit être placée à la fin de la zone d'arrêt, là où la vitesse est faible. La plage de dépôt (zone située en amont du « mur ») doit être correctement dimensionnée pour contenir le volume des avalanches successives venant heurter la digue.



Figure 1. *Digue d'arrêt et tas freineurs à Neskaupstaður, dans l'Est de l'Islande. La digue d'arrêt fait 17 mètres de haut et 400 m de long. Chaque tas freineur a une hauteur de 10 m et une longueur de 10 m à son sommet.*



Figure 2. *Digues et tas fraineurs à Taconnaz aux environs de Chamonix en France. La digue d'arrêt frontal fait 15 m de haut et la hauteur de la digue latérale varie entre 8 m (au sommet du dispositif) et 12 m (au bas du dispositif).Chaque tas freineur a une hauteur de 6 m.*

Les murs verticaux induisent plus de perte d'énergie que les pentes relativement douces (1 :1.5) des digues en terre. Dans le cas de Bleie, en Norvège (Figure 3), le choix d'une structure en béton armée de 10 m de haut, plutôt qu'une digue en terre de 15 m de haut, a été fait. Si le coût est plus élevé (5.6 million NOK dans ce cas), il était justifié ici par la nécessité de conserver le maximum de terre arable.



Figure 3. *Mur d'arrêt en béton armé à Bleie, Ullensvang, Norvège. La digue de 10 m de haut a une épaisseur d'environ 35 cm de large.*

Les digues d'arrêt peuvent également être placées dans la zone d'écoulement de l'avalanche. Ce fut le cas par exemple de la digue de Bleie (Figure 3), qui fut placée dans le couloir d'avalanche à la fin d'une longue pente douce, donc une première zone d'arrêt, avant que l'avalanche n'accélère de nouveau pour mourir environ 1200 m plus bas dans la pente. Dans ce cas, la zone située en aval de la digue n'était pas une zone de départ d'avalanche.

Ce n'est pas le cas de la digue de Brun à Seyðisfjörður en Islande. Cette dernière est également placée dans la zone d'écoulement de l'avalanche. Mais la zone située en aval est elle-même une zone de départ d'avalanche (dans environ 1 cas sur 10, l'avalanche se déclenche dans cette zone aval). Il existe donc un risque résiduel, qui est traité par des évacuations de la population.



Figure 4. *Digue de Brun (Seyðisfjörðu, Islande)*

1.2 Les digues déflectrices

La digue déflectrice, de conception comparable à une digue d'arrêt, fait quant à elle un angle avec la direction de l'écoulement (Figure 2, Figure 5, Figure 6). Cet angle doit être aussi faible que possible, bien qu'il ne soit pas toujours possible de respecter cette prescription du fait d'une limitation de place. En choisissant un angle de déviation suffisamment faible, la hauteur de la digue est plus faible que celle d'une digue d'arrêt qui serait positionnée au même endroit. Par ailleurs, la digue de déviation peut être placée beaucoup plus haut dans la zone d'arrêt ou même dans la zone d'écoulement. Cependant, il faut garder à l'esprit que pour protéger une même région, une digue de déviation doit être beaucoup plus longue qu'une digue d'arrêt.



Figure 5. *Digues déflectrices à Flateyri, au nord-ouest de l'Islande. Les digues ont une hauteur de 15 à 18 m, une longueur de 1250 m et un angle de déviation de 18 à 25°.*



Figure 6. *Digues déflectrices à Siglufjörður au nord de l'Islande. La digue la plus imposante a une hauteur de 18 m pour une longueur de 700 m et un angle de déviation de 15 à 18°. La plus petite fait 15 m de haut, 200 m de long et son angle de déviation est de 10°.*



Figure 7. *Digue déflectrice de Brun (Seyðisfjörður, Islande)*

1.3 Tas freineurs et dents freineuses

Les tas freineurs sont des constructions de forme pyramidale placées côte à côte, en rangée et transversalement à l'écoulement dans la zone d'arrêt de l'avalanche (Figure 1, Figure 2). Ce sont généralement des buttes en terre, en maçonnerie ou en gabion. Dans le cas de rangées multiples, les tas freineurs sont placés en quinconce. Les structures plus élongées transversalement à l'écoulement sont parfois appelées en anglais « braking dams » (soit en traduction littérale digue freineuse). C'est un terme que l'on ne retrouve pas en français : on parlera de dents freineuses lorsque l'ouvrage est en béton armé, ce qui conduit effectivement à une épaisseur dans le sens de l'écoulement moindre que pour un ouvrage en terre. L'objectif des tas freineurs est de réduire la vitesse de l'avalanche et d'entraîner un dépôt partiel de la masse en mouvement ; la distance d'arrêt peut être ainsi réduite ou la digue d'arrêt placée à l'aval peut être moins élevée. Les tas freineurs sont davantage efficaces contre les avalanches de neige humide et ont généralement peu d'effet vis-à-vis des avalanches de neige sèche ou des avalanches poudreuses. Les tas freineurs avec une face amont raide (Figure 8) ont la réputation d'être plus efficaces que les tas freineurs de forme conique.



Figure 8. *Détail des tas freineurs de Neskaupstaður, dans l'Est de l'Islande, dont le dispositif d'ensemble est présenté sur la figure 1. Chaque tas freineur a une hauteur de 10 m et une longueur de 10 m à son sommet. La face la plus raide fait face à l'écoulement.*

1.4 Critères de conception traditionnels des dispositifs de protection dans les zones d'arrêt d'avalanche

La dynamique de l'écoulement des avalanches heurtant des dispositifs de protection telles que les digues d'arrêt, les digues déflectrices ou encore les tas freineurs est encore relativement mal comprise et peu étudiée. Plusieurs méthodes sont traditionnellement utilisées pour concevoir de tels dispositifs [NOR 94] [MCL 93] et quelques avancées ont été faites au cours des dernières années pour améliorer la compréhension de leur fonctionnement. En dépit de ces avancées, il existe encore de nombreuses incertitudes quant à la caractérisation de leur efficacité. Or cette information est fondamentale notamment quant il s'agit de communiquer avec les populations et les autorités locales dans les régions soumises à un risque d'avalanche.

1.4.1 Digue d'arrêt

La hauteur d'une digue d'arrêt est habituellement déterminée à partir de la formule suivante :

$$H = H_v + H_s + H_f \qquad \mathbf{1}$$

où H_v est la hauteur nécessaire pour faire face à l'énergie cinétique (en d'autres termes la vitesse) de l'avalanche, H_s est l'épaisseur de la neige au sol à l'amont de la digue avant que l'avalanche ne vienne la heurter et H_f est la hauteur de l'écoulement de neige.

De plus l'emplacement de la digue d'arrêt doit être choisi de telle sorte qu'il y ait suffisamment d'espace à l'amont de la digue pour pouvoir stocker le volume estimé de l'avalanche de référence servant à dimensionner le projet. Généralement, la digue est positionnée sur une pente inférieure à 10-15° sur sa partie amont, et ce depuis une distance suffisamment longue, pour lui permettre d'être efficace. On calcule généralement le volume de l'avalanche qui doit être stocké en considérant les hypothèses suivantes : le facteur de compaction de la neige, par rapport à la densité de neige dans la zone de départ de l'avalanche, est de 1.2-1.5 et l'angle du dépôt à l'amont du dispositif est d'environ 5° par rapport à l'horizontal. Des mesures récentes faites sur le site

expérimental du Ryggfonn en Norvège montrent que les hypothèses faites pour le coefficient de compaction et l'angle du dépôt conduisent à une surestimation de la capacité de stockage de la digue [LIE 2002]. De ce fait, il est préférable de considérer une absence de compaction de la neige et un angle de dépôt nul.

Les termes H_s et H_f issus de l'équation 1 varient de quelques à plusieurs mètres dans le cas de couloirs non confinés et doivent être estimés à partir de la connaissance des conditions d'accumulation de neige au droit de la digue. Quant au terme H_v, il est calculé à partir de l'équation 2.

$$H_v = v^2/(2\lambda g) \quad \textbf{2}$$

v est la vitesse de l'avalanche dite de projet au niveau de la digue, λ est un paramètre empirique et $g=9.8 m/s^2$ est l'accélération de la gravité.

Le paramètre empirique λ est censé représenter l'effet de la quantité de mouvement perdue par l'avalanche lorsqu'elle heurte le dispositif ainsi que l'effet du frottement de l'avalanche le long de la face amont de la digue durant le run-up (remontée de l'avalanche le long de la digue qu'elle vient de heurter). La valeur de λ est généralement choisie entre 1 et 2 (parfois plus), les valeurs les plus hautes étant choisies pour les tas présentant des faces amont raides. Les valeurs élevées de λ (conduisant aux digues de faible hauteur) sont choisies lorsque la probabilité d'occurrence d'avalanches importantes est faible, alors que les faibles valeurs de λ (conduisant aux digues de hauteur élevée) sont choisies pour des couloirs d'avalanches où peuvent être déclenchées des avalanches extrêmes mettant en mouvement un volume de neige important.

1.4.2 Digues déflectrices

La hauteur des digues déflectrices est habituellement calculée en se basant sur la même équation (équation 1) que celle développée pour les digues d'arrêt, à la différence près que le terme H_v est déterminé par l'équation suivante :

$$H_v = (v\sin\varphi)^2/(2\lambda g) \quad \textbf{3}$$

où v, λ et g ont la même signification que pour l'équation (2) et φ est l'angle de déflection de la digue. Les termes H_s et H_f sont déterminés de la même façon que dans le cas des digues d'arrêt. Pour les digues déflectrices, la valeur du coefficient λ est généralement choisie égale à 1. Le fait de choisir 1 conduit implicitement à négliger la perte de quantité de mouvement de l'avalanche lorsqu'elle heurte la digue et les effets du frottement de l'avalanche le long de la face amont de la digue. Ceci conduit donc à des digues plus hautes que lorsque le coefficient est choisi supérieur à 1. Ceci peut être assimilé à une marge de sécurité sachant qu'il y a toujours une incertitude dans la détermination de l'angle de déflection, le choix des lignes de courant de l'avalanche restant subjectif. Cela correspond également à une marge de sécurité afin de prendre en compte les forces de pression interne qui conduisent à un run-up plus important que supposé dans la simple écriture de l'équation 3 dans laquelle de tels effets sont négligés.

Récemment, une méthode [IRG 98] basée sur les modélisations de type centre de masse a été développée pour déterminer les hauteurs des digues déviatrices. Cette méthode permet de prendre en compte la pente du terrain à l'endroit où la digue est positionnée, la pente de la face avant de la digue et le frottement de l'avalanche le long de la digue. Les effets liés à la pression interne issue de l'impact entre la digue et l'avalanche ne sont cependant pas pris en compte par cette méthode.

1.4.3 Les tas freineurs

Il n'existe actuellement pas de guide de conception de tas freineurs et dents freineuses bien que ces ouvrages soient largement utilisés en tant que dispositifs de protection.

Des expériences de laboratoires sur modèles réduits ont été réalisées dans le cadre du projet CADZIE afin d'améliorer la connaissance de la dynamique de l'écoulement des avalanches au sein d'un dispositif constitué de tas freineurs et de digues d'arrêt et de quantifier le ralentissement généré. Ces expérimentations sont décrites dans les sections 4.1.3 et 3.2.

2 Influence du transport éolien de la neige au niveau des digues d'arrêt et des tas freineurs

L'efficacité des ouvrages de défense passive vis-à-vis des avalanches dépend largement de leur hauteur effective par rapport à la hauteur de l'écoulement. Ainsi des dépôts de neige dus à de précédentes avalanches ou liés à d'importants épisodes de transport de neige par le vent (c'est le cas notamment en Norvège et en Islande)

peuvent réduire de façon significative la hauteur effective des dispositifs de protection. Ceci conduit à une diminution de leur efficacité. Différents types d'ouvrages, incluant digues d'arrêt et tas freineurs, de taille et hauteur différentes, ont été testés dans la soufflerie du Cemagref de Grenoble et ce pour différentes directions de vent. Les dépôts obtenus ont été mesurés à l'aide d'une diode laser afin d'en obtenir une image tridimensionnelle.

2.1 Principes de la modélisation physique et limite d'utilisation d'une telle approche

Dans le domaine du transport éolien de la neige, comme dans celui des avalanches, les expérimentations in situ sont souvent longues et couteuses. Les expériences sur modèles réduits en laboratoire permettent de s'affranchir de ces difficultés et la modélisation physique en soufflerie est de fait utilisée depuis les années 30. La transposition des résultats issus de la maquette à la réalité nécessite l'utilisation de critères dit de similitude. En pratique, tous les critères de similitude identifiés ne peuvent être respectés simultanément. Depuis les années quatre-vingt, un nombre important de publications visant à optimiser l'utilisation de ces critères de similitude a été réalisé. Nos propres expérimentations dans la soufflerie diphasique du Cemagref ont montré que :

- l'écoulement doit être turbulent développé,
- les dimensions géométriques de la maquette doivent être réduites à la même échelle,
- $\left[\frac{u_*}{u_{*th}}\right]_m = \left[\frac{u_*}{u_{*th}}\right]_r$,
- $\frac{U_F}{u_{*th}} > 1$ afin que le transport par saltation soit prédominant,
- la longueur de saltation doit être inférieure à la longueur caractéristique de la saltation,

où U_F ($m.s^{-1}$) est la vitesse de chute de la particule, u_* ($m.s^{-1}$) est la vitesse de frottement, u_{*th} ($m.s^{-1}$) est la vitesse de frottement seuil d'arrachement des particules, r et m se rapportent respectivement aux écoulements réels et modélisés.

Il n'est pas possible d'estimer correctement la durée réelle de la formation de la congère.

En fait, l'un des principaux problèmes tient au fait que le diamètre des particules ne peut être réduit à l'échelle géométrique de la maquette.

En effet, lorsque le nombre de Reynolds de la particule $\mathrm{Re} = \frac{u_* D_p}{\upsilon}$ est supérieur à la valeur de 3.5, la particule se comporte comme un grain isolé. Dans ce cas, la surface peut être considérée comme "aérodynamiquement rugueuse" [BAG 41]. Lorsque la vitesse du fluide augmente, les grains qui émergent de la sous-couche visqueuse, sont soumis à une contrainte croissante et se mettent en mouvement : la vitesse de frottement seuil d'arrachement des particules est d'autant plus forte que le diamètre des particules est grand. Lorsque le nombre de Reynolds de la particule est inférieur à 3.5, l'écoulement est turbulent lisse et la vitesse de frottement seuil d'arrachement des particules est d'autant plus forte que le diamètre des particules est petit (Figure 9). Ceci n'est pas uniquement dû aux forces de cohésion intervenant pour de fines poudres; la paroi étant dynamiquement lisse, les particules sont dans ce cas noyées dans la sous-couche visqueuse.

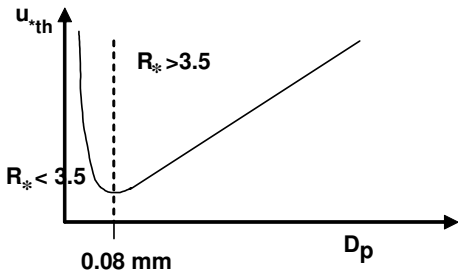

Figure 9. *Vitesse de frottement seuil en fonction du diamètre des particules pour du sable dans l'air (d'après Bagnold 1941)*

Etant donné que le diamètre des particules de neige transportée est d'environ 100 µm, la mise à l'échelle géométrique des particules de neige conduirait à l'utilisation de grains de faible diamètre. Dans ce cas (Re<3.5), la vitesse d'arrachement seuil des particules u_{*th} est importante et le rapport entre la vitesse de chute et la vitesse d'arrachement seuil des particules $\frac{U_F}{u_{*th}}$ est inférieur à 1, si bien que le transport par diffusion turbulente devient prédominant par rapport au transport par saltation et la formation des congères n'est plus observée. Donc dans la pratique, l'échelle géométrique n'est pas respectée pour les particules et de ce fait, la longueur des trajectoires de saltation n'est pas non plus à l'échelle (elle est plus longue que ce qu'elle devrait être). La longueur de saltation doit être plus petite que la longueur caractéristique de la congère (dans le cas contrainte, la trajectoire de saltation ne serait pas modifiée par le sillage de l'obstacle). L'échelle du modèle réduit doit donc être choisie en fonction de cette contrainte supplémentaire.

2.2 Comparaison entre les différents types d'ouvrages de défense passive

2.2.1 Dispositif expérimental

L'évolution théorique d'une congère générée par un obstacle de caractéristiques géométriques données peut être représentée de la façon suivante (Figure 10) :

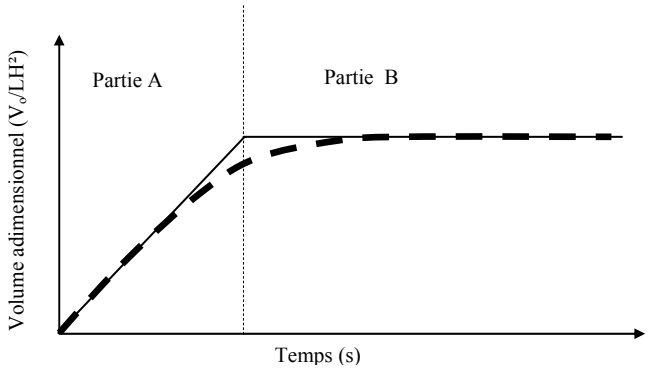

Figure 10. *Evolution temporelle de la formation d'une congère*

Dans un premier temps (partie A, Figure 10), le volume adimensionnel (ligne continue) augmente quasi-linéairement avec le temps pour atteindre la saturation (partie B, Figure 10) où le volume accumulé est alors indépendant du temps. En réalité, l'évolution temporelle est plus justement représentée par la ligne discontinue ; si la croissance est effectivement linéaire au début de l'épisode, l'obtention de la saturation (la forme de la congère est aérodynamique et il n'y a plus stockage de neige) s'effectue progressivement. En considérant le respect du critère de similitude u_*/u_{*th} [ANN 84] [NAA 95] et l'absence de critères de temps pertinents, il est cependant possible de comparer les congères générées par des digues et des tas freineurs à saturation. Du point de vue du concepteur, il est nécessaire d'étudier la configuration la plus défavorable, ce qui correspond dans notre cas à une tempête longue avec une vitesse de vent faible : en effet, plus fort est le vent, plus petite est la congère. Nous avons ainsi considéré une vitesse de frottement de 0.31 cm/s conduisant à un rapport u_*/u_{*th} de 1.1. Ceci permet par ailleurs d'obtenir une faible longueur de saturation. Les caractéristiques des particules utilisées sont présentées dans le tableau 1.

Cependant les dimensions des tas freineurs et des digues sont importantes et il semble peu probable que la saturation soit atteinte. Il est donc nécessaire de pouvoir comparer entre eux les différents dispositifs sans faire référence à la congère à saturation.

Lors des premiers stades de formation de la congère, c'est-à-dire au niveau de la partie A de la Figure 10, le volume adimensionnel de la congère augmente linéairement avec le temps [IVE 81]. Ainsi si on considère une situation dans laquelle l'accumulation est générée par un dispositif de hauteur h (m) et de largeur L (m), le volume de neige accumulé est proportionnel au flux massique de particules Q($kg.m^{-1}.s^{-1}$), à la largeur L (m) et à la durée de l'expérience t(s).

$$V_o \propto \frac{QLt}{\sigma} \quad \Rightarrow \quad \frac{V_0}{LH^2} = A\frac{Qt}{\sigma H^2} \qquad \textbf{4}$$

où σ est la densité apparente des particules déposées (kg.m^{-3}).

A correspond grossièrement au coefficient d'interception ŋ propose par Anno [ANN 84] et à la fonction f proposé par Iversen (1980, 1982,1984).

Iversen a proposé pour la fonction f, la formulation générale suivante, qui doit être déterminée pour chaque configuration.

$$f(\frac{u(H)L}{\nu}, \frac{h}{H}, \frac{l}{L}, \frac{z_o}{H}, \frac{z_{o'}}{H}, \frac{\rho}{\sigma}, \frac{U_F}{u_{*th}}, \frac{u_*^2}{gH}) \qquad \textbf{5}$$

Ainsi si l'on compare différentes accumulations générées par différents dispositifs de même hauteur h et largeur L et pour les mêmes conditions expérimentales (particules, vitesses, longueur de zone de reprise (et donc flux de particules) identiques), on peut considérer que la pente de la courbe tracée sur la partie A de la Figure 10 est représentative de l'efficacité (du point de vue de la quantité de neige accumulée) des dispositifs de protection. C'est cette méthodologie qui nous permettra de comparer entre eux les différentes digues et tas freineurs.

La soufflerie

Le dispositif expérimental utilisé est la soufflerie diphasique du Cemagref qui a été conçue de façon à permettre le transport de particules. En circuit fermé et d'une longueur totale de 13 m (Figure 11), elle dispose d'une veine d'étude de 4,5 m de long pour une section de 1 m sur 0,5 m. Sa vitesse maximale est de 17 m/s. Les particules sèches sont soit déposées de façon uniforme dans la zone d'alimentation et reprises par le flux d'air, soit injectées par le haut en début de veine. Les particules reprises sont éventuellement déposées sur la maquette disposée à l'aval dans le secteur de visualisation. Les particules qui ne sont pas déposées sur la maquette sont stoppées par des filtres dans la partie supérieure de la soufflerie, lorsque la gravité n'a pas été suffisante pour engendrer leur dépôt dans le divergent. Les profils de vitesse de vent peuvent être déterminés à partir d'un micro moulinet, d'un tube de pitot ou d'un film chaud. Les hauteurs de dépôt ont été mesurées à l'aide d'une diode laser (avec une précision de l'ordre du mm) déplacée sur un chariot de mesures bi-dimensionnel suivant un maillage de 5 mm (Figure 12) permettant d'obtenir une visualisation tridimensionnelle du dépôt engendré (Figure 13Figure 12).

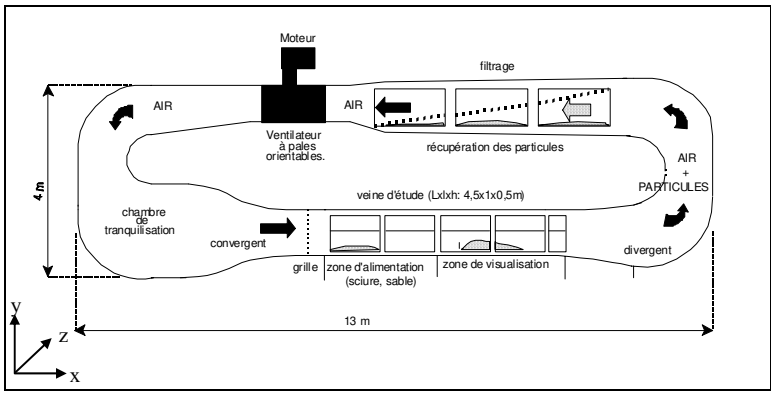

Figure 11. *Schéma de la soufflerie*

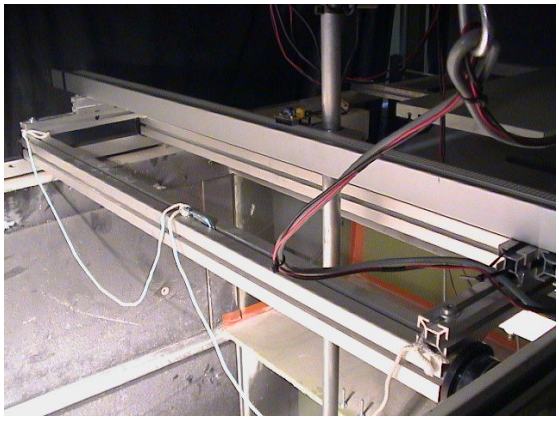

Figure 12. *Chariot de mesures avec diode laser*

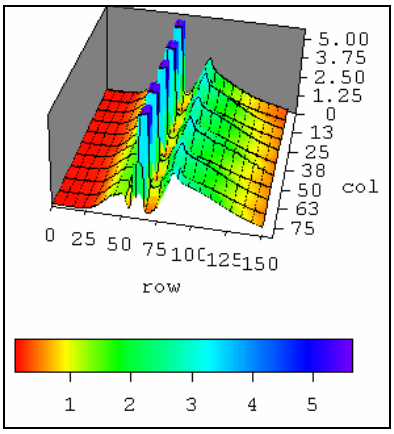

Figure 13. *Exemple de visualisation tridimen sionnel du dépôt généré.*

Les particules utilisées

Les caractéristiques des particules utilisées sont présentées dans le Tableau 1.

Particules	*Densité* σ kg/m^3	*Densité apparente* γ kg/m^3	*Diamètre moyen* D_p m/s	u_{*t} *(mesurée)* m/s	u_*/u_{*t} *(mesuré)*	U_F *(calculé pour un* D_p *moyen)* m/s	U_F/u_*	*Longueur de saltation* L_S m	*Angle de repos* °
Sable	2650	1200	115	0,28	1,1	0,72	2,3	0,03	33

Tableau 1. *Caractéristiques des particules utilisées*

Les modèles réduits utilisés

Les différents dispositifs de protection paravalanche testés ont les caractéristiques suivantes (Figure 61) :

No.	Nom du modèle	*Hauteur (H) [cm]*	*Largeur (B) [cm]*	*Distance entre tas freineurs* Δ *[cm]*	*Ratio H/B*	*Ratio* B/Δ	Caractéristiques particulières
1	Digue 2,5 cm	2,5	-	-	-		
2	Digue 3 cm	3	-	-	-		
3	Digue 5 cm	5	-	-	-		
4	Digue Semi-arrondie	3	44	-	-		
6	Tas freineurs A	5	7,5	5	0,67	1	
7	Tas freineurs B	5	5	3	1	1,66	
8	Tas freineurs C	2,5	5	3	0,5	1,66	
9	Tas freineurs D	5	10	15	0,5	0,66	
10	Tas freineurs coniques	5	10	0	0,5	-	
11	2 rangées de tas freineurs non décalées	5	10	6	0,5		Distance entre deux rangées : 30 cm
12	2 rangées de tas freineurs décalées	5	10	6	0,5		Distance entre deux rangées: 30 cm;

Pour plus de clarté, on trouvera ci-après des photographies (Figure 14 à Figure 24) des différents dispositifs.

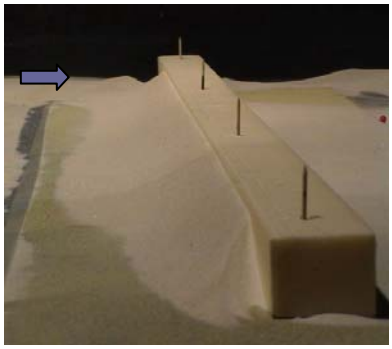

Figure 14. *Digue 2,5 cm après une heure de tempête*

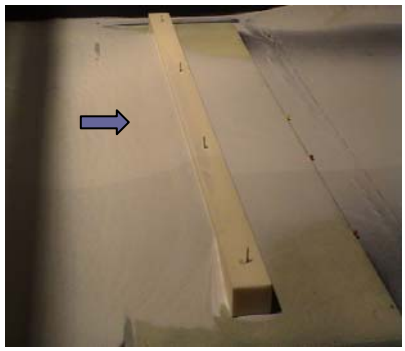

Figure 15. *Digue 3 cm après deux heures de tempête*

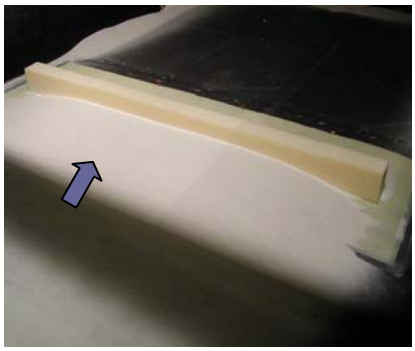

Figure 16. *Digue 5 cm après une heure de tempête*

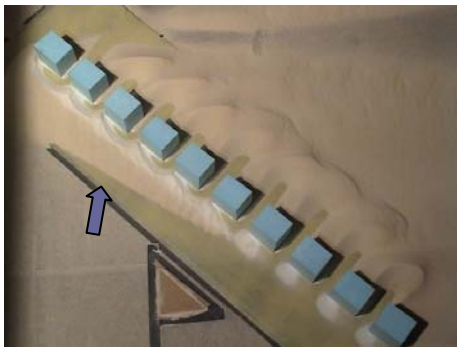

Figure 17. *Tas freineurs B après une heure de tempête*

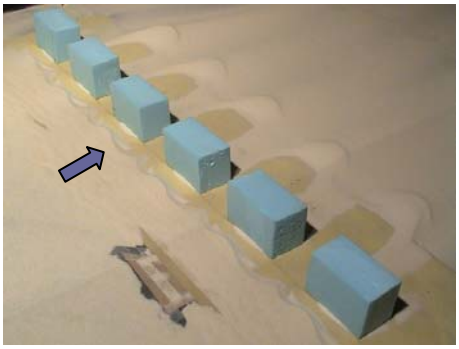

Figure 18. *Tas freineurs A après trois heures de tempête*

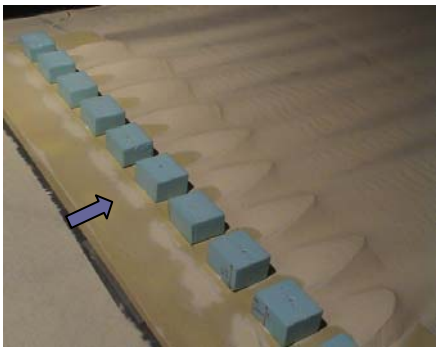

Figure 19. *Tas freineurs C après trois heures de tempête*

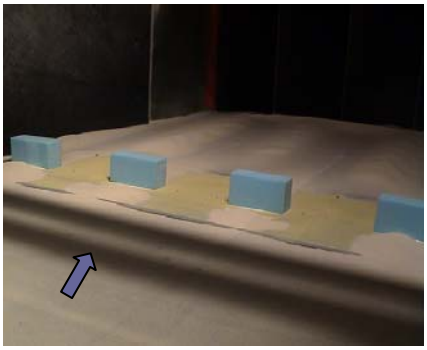

Figure 20. *Tas freineurs D après trois heures de tempête*

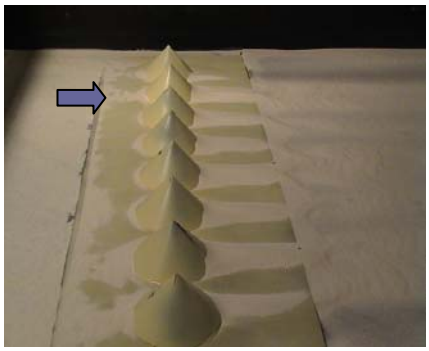

Figure 21. *Tas freineurs coniques après trois heures de tempête*

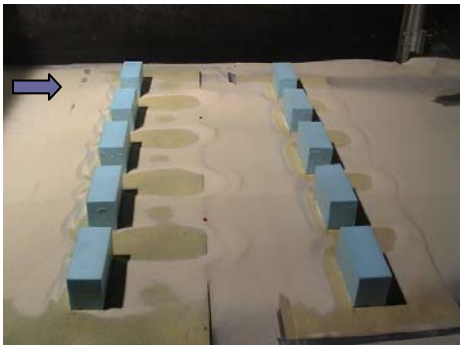

Figure 22. 2 rangées de tas freineurs non décalés après trois heures de tempête

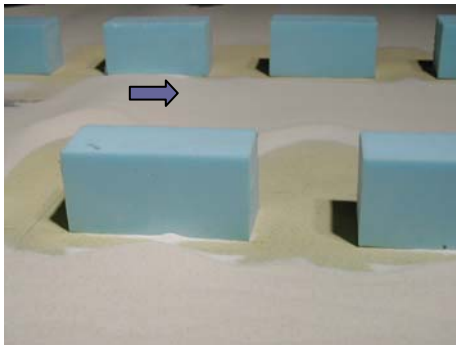

Figure 23. 2 rangées de tas freineurs décalés après trois heures de tempête

Trois directions de vent ont été testées (0°, 45° et 90°).

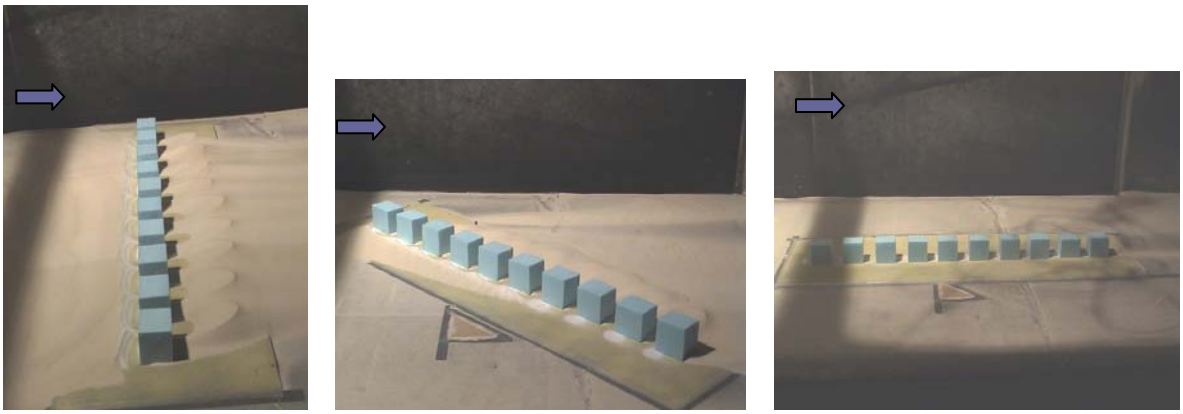

Figure 24. *Dispositif expérimental (respectivement à 90°, 45° et 0°). Les flèches indiquent la direction du vent.*

2.2.2 Résultats obtenus

Afin de permettre des comparaisons entre les structures, les volumes accumulés ont été adimensionnés par la largeur et la hauteur au carré des structures étudiées.

$$V_{adimensionnel} = V/(l*H^2) \quad \textbf{6}$$

Les résultats de l'ensemble des expériences réalisées sont synthétisés sur la Figure 25 et la Figure 26 qui représentent l'évolution temporelle du volume adimensionnel pour les différentes configurations testées. Des résultats plus détaillés sont disponibles dans le rapport final du projet européen CADZIE.
Ce sont les tas freineurs B qui génèrent le plus de dépôt, davantage même que la digue de même hauteur. Les tas freineurs C semblent avoir le même comportement aérodynamique que les précédents, générant eux aussi un dépôt plus volumineux que celui engendré par une digue de même hauteur. Il semble que vis-à-vis de l'accumulation de neige le rapport B/Δ joue un rôle important. En effet, plus ce rapport est petit, plus la quantité de sable accumulée est faible. Ainsi les tas freineurs D, pour lesquels ce rapport est égal à 0,66, génèrent le moins de dépôts : l'accumulation est encore plus faible que celle produite par les tas freineurs coniques qui individuellement ont une forme beaucoup plus aérodynamique. Dans le cas des tas freineurs A, ce rapport est égal à 1, et les accumulations générées bien que supérieures (facteur 2) à celle entraînées par les tas freineurs D restent largement inférieures (facteur 5) à celles générées par les tas freineurs B, et ceci à une hauteur équivalente. Par contre, du point de vue de la dissipation d'énergie de l'avalanche dense, les essais expérimentaux menés en Suisse ont montré que les digues et tas freineurs B étaient plus efficaces que les tas freineurs D. Ceci montre le conflit d'intérêt apparaissant lors du choix du dispositif de protection : un dispositif de protection moins sensible aux effets du transport de la neige par le vent sera aussi moins efficace vis-à-vis des écoulements d'avalanches denses. Il est à noter cependant que dans le cas des digues, l'essentiel du dépôt se produit au vent de la structure (Figure 16) alors que dans le cas des tas freineurs, cette accumulation se produit sous le vent. Donc dans ce dernier cas, le problème ne se posera véritablement que si le vent souffle dans la direction opposée à l'écoulement de l'avalanche, ce qui somme toute, correspond à une situation plutôt rare !

Du point de vue du transport éolien, il est préférable de décaler deux rangées de tas freineurs (ce qui correspond à la configuration adoptée pour les dispositifs paravalanche), plutôt que de les positionner exactement l'une derrière l'autre (ceci dans le cas où les rangées seraient suffisamment proches (inférieure à 10 H)) pour que leurs sillages interagissent. Quel que soit le dispositif, un vent perpendiculaire à l'axe de la digue ou aux rangées de tas freineurs, correspond à la situation la plus critique. En moyenne, le volume de particules accumulées diminue de 55% à 65% pour une direction de vent de 45° et il devient négligeable pour une direction de vent de 0°.

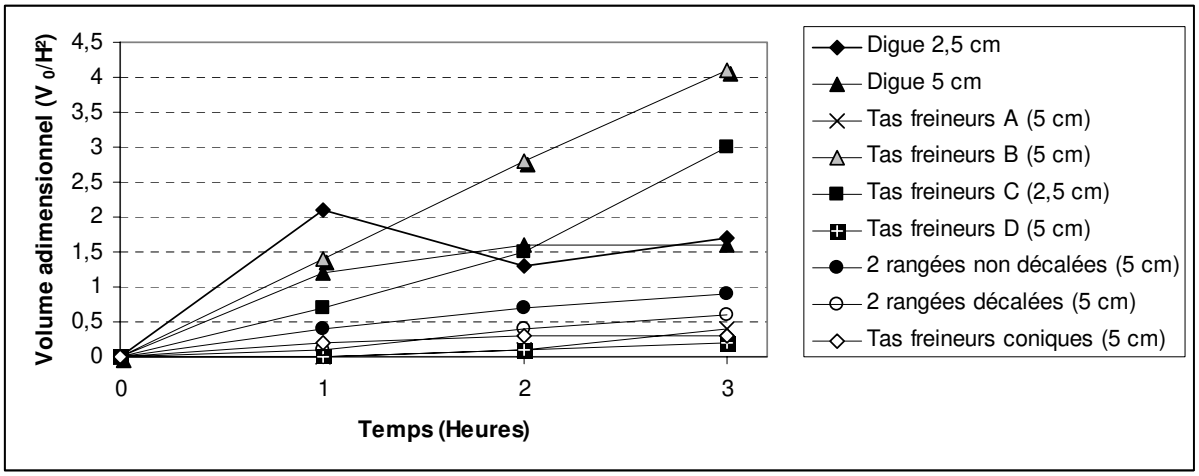

Figure 25. *Evolution temporelle du volume adimensionnel pour les différentes configurations et pour un vent à 90°*

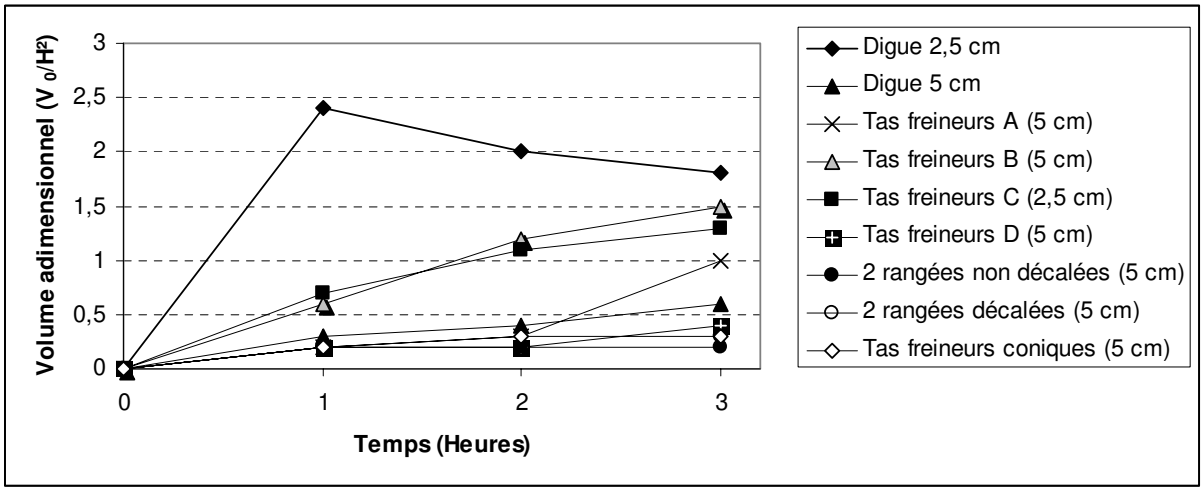

Figure 26. *Evolution temporelle du volume adimensionnel pour les différentes configurations pour un vent à 45°*

3 Avalanche de neige dense et dispositifs de protection

3.1 Modèle réduits expérimentaux, outils et méthodes

L'étude de l'interaction entre une avalanche de neige dense et un ouvrage de protection a été principalement réalisée à partir d'une analyse physique à petite échelle, utilisant des modèles réduits instrumentés de laboratoire. Les avalanches de neige dense et sèche, conduisant aux évènements majeurs, sont assimilées à des *écoulements granulaires secs peu cohésifs*. Les outils que nous avons utilisés sont des modèles réduits de laboratoire. Une vue schématique est donnée sur la Figure 27. La méthode consistait à comparer un écoulement non perturbé (écoulement de référence sans obstacle) à un écoulement avec obstacle.

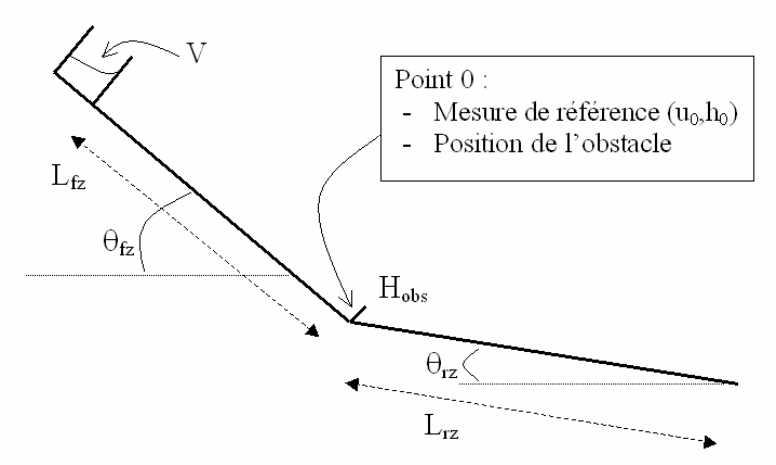

Figure 27. *Vue schématique du modèle réduit, procédure et notations.*

Deux points ont fait l'objet d'investigations :

- **Effets locaux**: zones d'influence (zone de stagnation ou « zone morte » à l'amont de l'obstacle, jet granulaire en aval de l'obstacle) et réduction de vitesse
- **Effet global**: effet de la hauteur de l'obstacle sur la réduction de l'extension maximale de l'avalanche.

Différents types de formes ont été testées. Une série d'expériences a été réalisée avec des géométries simples, c'est-à-dire, une digue verticale de hauteur H. Des géométries plus complexes telles que des tas freineurs ont également été testées. Les résultats de toutes les expériences sont résumées et présentées dans le Deliverable 4 du projet européen CADZIE. Ces résultats sont aussi appliqués à des échelles plus larges pour des géométries simples voisines de celles testées en laboratoire (section 3.2), à l'aide des critère de similitude principalement basés sur la similitude de Froude. Ces résultats doivent être considérés en prenant en compte leurs limitations (discutée dans la section 3.3). Ils ont été obtenus à partir d'écoulements en modèles réduits de laboratoire avec des matériaux granulaires secs et non cohésifs pour des géométries simples. Les résultats sont finalement appliqués à un cas de terrain complexe dans la section 3.4, à l'aide des nouveaux développements en modélisation numérique.

3.2 Résultats des modèles réduits

3.2.1 Effets locaux

3.2.1.1 Régimes d'interaction écoulement / obstacle

L'étude de l'interaction des écoulements granulaires et des écoulements de neige (voir Deliverable 3) met en évidence deux régimes sur la base d'une similitude de Froude [FAU 2003a]:

- Un régime à faible nombre de Froude (ou régime « lent ») pour lequel les processus de dépôt à l'amont de l'obstacle sont dominants. Il en résulte que la réduction de la distance d'arrêt est fortement dépendante du volume retenu en amont de l'obstacle. La rhéologie du matériau est cruciale pour ce régime.
- Un régime à fort nombre de Froude (ou régime inertiel) pour lequel la perte locale de vitesse est dominante. Il en résulte une réduction significative de l'extension maximale de l'avalanche. La rhéologie du matériau est moins cruciale dans ce cas.

Le nombre de Froude des avalanches de neige dense est généralement compris entre 0 et 15, dépendant des différents paramètres tels que le type de neige ou la phase d'écoulement considéré (déclenchement, accélération, décélération). Ainsi, les avalanches de neige dense peuvent exhiber les deux régimes.

Les méthodes pour calculer la longueur de jet en aval et la longueur du dépôt en amont sont présentées dans les sections suivantes.

3.2.1.2 Longueur de jet

Les expériences ont montré que l'interaction d'une avalanche granulaire supercritique (Fr>>1) avec une digue ou une rangée de tas freineurs conduit à la formation d'un jet. Une large fraction de l'écoulement est projetée depuis le sommet du tas et revient impacter le sol à une certaine distance (schéma, Figure 28 et photographie, Figure 29). Pour des obstacles dont la face amont est raide, les particules sont projetées depuis le sommet de l'obstacle à un angle proche de l'inclinaison de la face amont de l'obstacle (α sur la Figure 28). Le jet s'ajuste rapidement à un nouvel angle due à la formation d'une zone morte (en forme de coin : « wedge » sur la Figure 28) sur la face amont de l'obstacle. Cet angle est appelé angle de jet et noté β. L'écoulement passe alors au dessus de l'obstacle formant un jet en régime quasi-stationnaire (Figure 28 et Figure 29). Le jet vient impacter le sol loin en aval des tas freineurs.

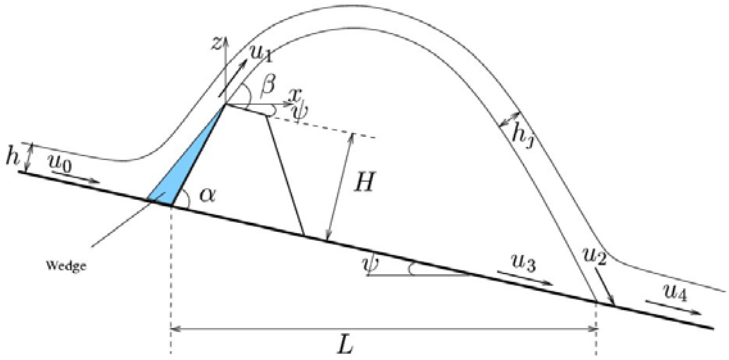

Figure 28. *Vue schématique du jet de longueur L. On note h la hauteur de l'écoulement incident et h_j l'épaisseur du jet. Le jet est dévié par dessus l'obstacle (tas ou digue) de hauteur H à un angle β. L'inclinaison du terrain est ψ. La face amont du tas est incliné à un angle α par rapport à la pente. Les vitesses u_0, u_1, u_2, u_3 et u_4 à différentes positions dans la direction de l'écoulement sont indiquées sur la figure.*

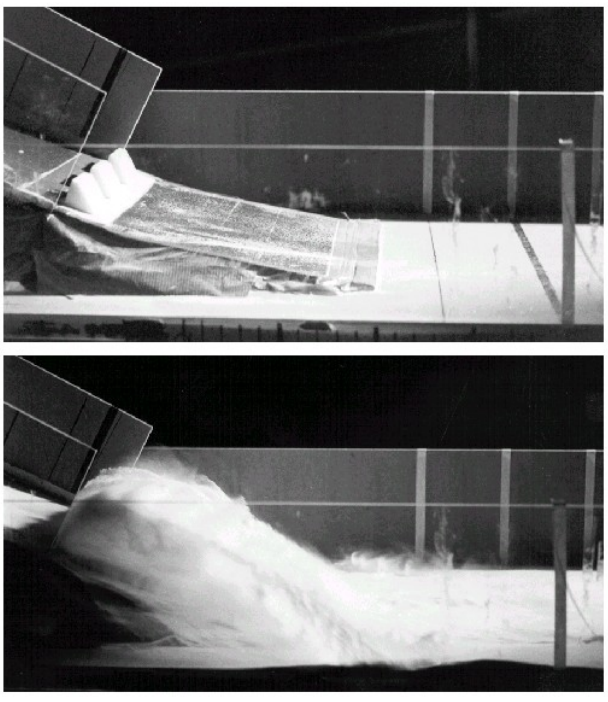

Figure 29. *Photographies de (a) la configuration géométrique de la rangée de tas et (b) du jet en régime quasi-stationnaire sur les expériences en canal incliné de 6 m de longueur à Bristol [HAK 2003c].*

Les dissipations d'énergie prennent lieu à l'impact du jet avec le sol et aussi lors de l'interaction du jet avec l'obstacle. L'interaction du jet avec l'air provoque également des dissipations d'énergie. Le jet formé lors de

l'interaction de l'écoulement avec les tas a des conséquences pratiques importantes pour l'utilisation de rangées multiples de tas ou la combinaison de rangées de tas avec une digue d'arrêt. L'espace entre les rangées de tas doit être choisi correctement de manière à ce que le matériau projeté issu de la première rangée de tas ne vienne pas impacter plus loin que l'obstacle suivant (autre rangée de tas ou digue d'arrêt).

La trajectoire du jet généré par les tas peut être approximativement assimilée au mouvement d'un projectile (Figure 28). L'équilibre des forces implique :

$$\vec{F} = m\vec{g} - m(f/h_j)\dot{\vec{x}}\|\dot{\vec{x}}\|$$

où $\vec{F}$ est la force exercée sur le volume de masse m, g la gravité, f un paramètre sans dimension constant représentant la résistance turbulente causée par l'air, h_j est l'épaisseur du jet, $\vec{x}$=(x,z) est la position des particules dans les dimensions horizontale et verticale, respectivement, avec l'origine au sommet du tas.

L'équilibre des forces conduit aux équations:

$$\ddot{x} = -(f/h_j)\dot{x}\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{z}^2} \qquad \textbf{7}$$

$$\ddot{z} = -g - (f/h_j)\dot{z}\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{z}^2} \qquad \textbf{8}$$

avec les conditions initiales et aux limites

x=z=0 at t=0

et $\dot{x}(0) = u_1\cos(\beta - \psi)$ et $\dot{z}(0) = u_1\sin(\beta - \psi)$

où β est l'angle de jet et ψ est l'inclinaison de la pente où sont situés les tas. La longueur horizontale du jet, L (Figure 28), peut être estimée en résolvant les deux équations avec des valeurs appropriées pour u_1, β et f/h_j. Les recommandations pour les valeurs de ces paramètres concernant les écoulements naturels d'avalanches de neige sont données ci-dessous.

- Paramètre d'entrée: **u_1**

La vitesse de jet u_1 peut exprimée comme suit:

$$u_1 = k\sqrt{u_0^2 - 2gH\cos\psi}\ ,$$

où u_0 est la vitesse incidente, H la hauteur des tas et k un paramètre sans dimension représentant la perte d'énergie impliquée dans l'impact de l'avalanche avec les tas. La valeur k=1 correspond à une situation où aucune énergie n'est perdue lors de l'impact. Les résultats expérimentaux indiquent une gamme de valeurs comprises entre 0.5 et 0.8 pour des hauteurs de tas et de digue 2 à 3 fois plus hauts que l'écoulement incident ([HAK 2001], [HAK 2003a]), avec la plupart des valeurs comprises entre 0.6 et 0.7. Pour les avalanches de neige naturelles, il est recommandé de calculer trois longueurs de jet avec les valeurs 0.7, 0.8 et 0.9 et que le résultat pour k=0.8 soit utilisé pour calculer la distance minimale entre une rangée de tas et l'ouvrage suivant (autre rangée de tas ou ouvrage de rétention en aval)

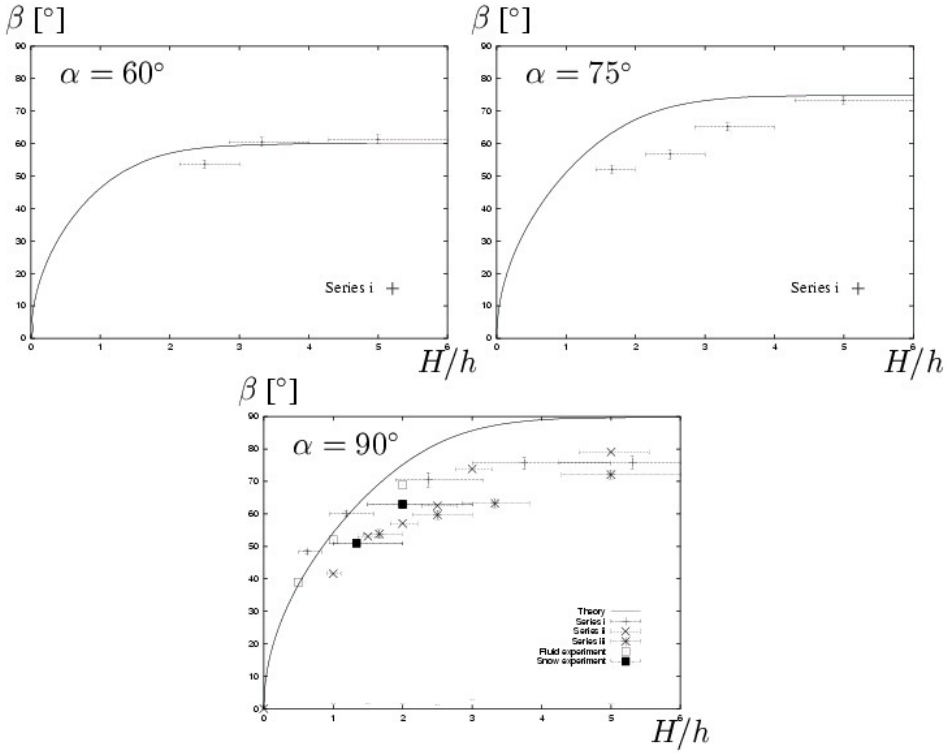

Figure 30. *L'angle de jet, β, en fonction de la hauteur des tas normalisée, H/h, pour différents angles, α , entre la face amont des tas et l'inclinaison du terrain. Les points correspondent aux résultats expérimentaux obtenus avec des billes de verre avec des canaux de longueur 3, 6 et 9 m. La légende «Snow experiments » correspond à des expériences avec de la neige sur le dispositif expérimental du Weissfluhjoch et la légende «Fluid experiments » correspond à des expériences avec de l'eau décrites par Yih (1979)*

- Paramètre d'entrée: **β**

La Figure 30 montrent les courbes théoriques obtenues pour l'écoulement d'un fluide incompressible irrotationnel si les effets de la gravité sont négligés [YIH 79]. Les résultats expérimentaux indique que la théorie surestime l'angle de jet limite, β. Pour des tas avec H/h≈2-3 et α=90°, l'angle théorique β devrait être réduit de 20-25°. Pour α=75°, β devrait être réduit de 10-20°. Pour α=60°, il devrait être réduit de 0-10°. Il est recommandé de choisir l'angle de jet sur la base de ces considérations.

- Paramètre d'entrée: **f/h_j**

Le frottement turbulent exercé sur le jet (du à la résistance de l'air) est représenté par un paramètre sans dimension f, et dépend de l'épaisseur du jet (h_j) et la vitesse de jet (équations 7 et 8). La résistance de l'air n'affecte pas l'écoulement dans les expériences en modèles réduits de laboratoire (y compris dans les expériences avec la neige à échelle intermédiaire) et les trajectoires expérimentales sont par conséquent bien reproduites en utilisant une valeur nulle pour f dans les équations. En outre, les expériences à grande échelle avec l'eau suggèrent qu'entre 0% et 30% de l'énergie cinétique initiale du jet peut être dissipée lors de l'interaction du jet avec l'air ambiant [HAG 95] [NOV 89] [U.S.B.R. 87]. La densité d'une avalanche de neige (masse volumique de l'ordre de 100-400 $kg.m^{-3}$) est plus faible que celle de l'eau (masse volumique de $1000kg.m^{-3}$). Par conséquent, il est raisonnable de faire l'hypothèse que le jet de l'avalanche est au moins autant affecté par la résistance de l'air par rapport au cas de l'eau. En prenant f≈0.01 et h_j≈2-4m nous obtenons f/h_j=0.0025-0.005m^{-1}. Afin de réduire de 30% l'énergie cinétique d'un jet hydraulique d'une vitesse de 40$m.s^{-1}$, comme mentionné dans [NOV 89], f/h_j doit prendre une valeur de f/h_j≈0.004$m.s^{-1}$, qui est bien dans la gamme citée précédemment. Ici il est recommandé qu'une valeur de f/hj=0.004m^{-1} soit adoptée pour les calculs de longueur de jet.

Etant donné les recommandations pour les valeurs de u_1, β et f/h_j, les équations différentielles 7 et 8 peuvent être résolues numériquement avec les algorithmes disponibles afin d'obtenir la longueur de jet, pour déterminer

l'espacement minimal entre une rangée de structures dissipatrices et un autre ouvrage dans un projet d'aménagement.

3.2.1.3 Longueur de dépôt à l'amont

L'étude des écoulements granulaires en modèles réduits interagissant avec un obstacle de type « seuil » [FAU 2002] a montré que les processus de dépôt conduisent à la formation d'une zone de stagnation ou « zone morte » en amont du seuil. Quand l'avalanche interagit avec un obstacle, les mêmes processus sont attendus et conduisent à la formation d'une zone morte comme cela est illustré sur la Figure 31.



Figure 31. *Phénomènes de « zone morte » observés à Tacconnaz (France, Haute-Savoie 74)*

Longueur de dépôt maximale et volume retenu en amont d'une digue verticale

Ici nous considérons des digues d'arrêt et des structures dissipatives susceptibles d'être débordées. Les paramètres d'entrée qui sont nécessaires sont donnés ci-dessous (Tableau 2). La configuration géométrique considérée est donnée sur la Figure 27:

- La zone d'écoulement est canalisée avec une largeur moyenne l_{fz}
- L'obstacle a une face amont verticale et une hauteur H

Paramètres d'entrée	Notation	Unité
Volume initial de l'avalanche	V	m^3
Pente de la zone d'écoulement à l'amont	θ	radian
Largeur de la zone d' écoulement	λ_{fz}	m
Hauteur de l'obstacle	H	m
Pente moyenne du dépôt	θ_0	radian

Tableau 2. *Paramètres d'entrée pour le calcul de la longueur maximale de dépôt à l'amont.*

La longueur de dépôt maximale à l'amont de la digue est donnée par la formule suivante :

$$L_0 = \frac{H}{\tan(\theta - \theta_0)}$$

où θ_0 est la pente moyenne du dépôt. θ_0 dépend de plusieurs caractéristiques telles que le type de neige, la dynamique de l'avalanche à l'amont.

Le volume stocké en amont de l'obstacle vertical est alors donné (si bien sûr la condition $V_s \leq V$ est vérifiée) par :

$$V_s = \alpha L_0 H \lambda_{fz}$$

où α est un coefficient de forme. Si le volume retenu a une forme triangulaire (pente moyenne constante θ_0 dans ce cas), alors $\alpha = 1/2$.

Volumes retenus pour des configurations plus complexes

La configuration considérée ci-dessus est le cas le plus simple (« cas idéal »), correspondant à peu de cas naturels (zone d'écoulement canalisée et obstacle vertical). Le volume retenu est modifié en tenant compte des caractéristiques de la zone d'écoulement et des géométries d'obstacle, comme discutées ci-dessous. Quelques configurations pouvant être rencontrées sur le terrain sont présentées. Il ne s'agit pas d'une liste exhaustive.

- Digue verticale située dans une pente ouverte (3D)

Ici la pente à l'amont de l'ouvrage n'est pas confinée (3D). L'équation 9 est valide pour estimer la longueur de dépôt maximale à l'amont. L'étalement latéral et les débordement doivent être pris en compte pour estimer le volume retenu en amont. Les paramètres d'entrée sont : la longueur maximale de dépôt, la hauteur de la digue, la largeur moyenne de l'avalanche (si l'avalanche est moins large que l'ouvrage) ou longueur de la digue (si cette dernière est moins large que l'écoulement incident), la forme moyenne du dépôt retenu en amont (triangulaire, conique, elliptique,…)

- Digue non verticale

Le volume retenu est d'abord calculé dans le cas d'un ouvrage vertical équivalent (même hauteur) et dans un second temps ce volume est diminué du volume correspondant à l'angle de la face mont de l'ouvrage.

- Rangée de tas

Le volume retenu est la somme des volumes de dépôt formés en amont de chaque tas.

3.2.2 Effet global

3.2.2.1 Effet d'une digue verticale débordée sur la réduction de la distance d'arrêt

Cette section vise à estimer de quelle manière la hauteur d'une structure dissipatrice peut réduire l'extension maximale d'une avalanche en utilisant des lois d'échelle obtenues à partir de l'analyse dimensionnelle d'expériences de laboratoire sur modèles réduits. Ici nous considérons des digues verticales (l'inclinaison de la face amont n'est pas prise en compte) susceptibles d'être débordées.

Ici une « digue verticale » ne doit pas être regardée comme une « digue d'arrêt », mais comme la géométrie simplifiée et testée en modèles réduits de laboratoire. Le seul paramètre variable est la hauteur de l'obstacle H. La configuration des cas considérés et correspondant aux expériences de laboratoire sur modèles réduits sont d'abord décrites avec les paramètres d'entrée nécessaires. Dans un second temps une loi d'échelle est donnée concernant le régime inertiel (régime défini dans la section 3.2.1.1). Puis le cas particulier du régime « lent » (régime défini dans la section 3.2.1.1) est traité. Finalement une discussion sur l'extension des résultats à des géométries plus complexes est donnée.

Géométrie simplifiée de laboratoire et données d'entrée

La configuration traitée ici est décrite sur la Figure 27 :

- La zone d'écoulement est canalisée et a une largeur l_{fz}
- La zone d'arrêt est soit canalisée (largeur $l_{rz,}$) soit ouverte (3D)
- L'obstacle est situé à la transition entre la zone d'écoulement et la zone d'arrêt
- L'obstacle a une face amont verticale et sa hauteur est H
- La distance d'arrêt maximale de l'avalanche de référence (avalanche de projet sans obstacle) est d_0

- La distance d'arrêt maximale de l'avalanche avec obstacle) est D

Les données d'entrée nécessaires pour appliquer les formules proposées par la suite sont données dans le tableau suivant (Tableau 3).

Données d'entrée	**Notation**	**Unité**
Vitesse de référence de l'avalanche	u_0	$m.s^{-1}$
Volume initial de l'avalanche	V	m^3
Pente du terrain à l'amont de l'obstacle	θ	radian
Largeur de la zone d'écoulement	λ_{fz}	m
Hauteur de l'obstacle	H	m
Pente moyenne du dépôt à l'amont	θ_0	radian
Coefficient de perte d'énergie	α_{rr}	—

Tableau 3. *Données nécessaires pour le calcul de la réduction de la distance d'arrêt.*

Formules pour la réduction de la distance d'arrêt en régime inertiel

Aussi bien concernant les expériences en laboratoire que concernant les observations au Ryggfonn (site expérimental d'observations norvégien), on peut définir les variables sans dimension suivantes :

1) la distance d'arrêt maximale de l'avalanche normalisée par la hauteur de l'obstacle : $\frac{D}{H}$.

2) l'énergie cinétique incidente de l'avalanche (juste en amont de l'obstacle) normalisée par la hauteur de l'obstacle. Cette énergie cinétique normalisée peut être définie comme le carré du nombre de Froude de l'obstacle : $\frac{u_0^{\,2}}{2gH} = \frac{Fr_{obs}^{\,2}}{2}$.

Nous avons choisi des variables sans dimension pour comparer des données obtenues sur une gamme d'échelle très large (du mètre pour les modèles réduits les plus petits à la centaine de mètres au Ryggfonn) et pour essayer de mettre en évidence une éventuelle loi d'échelle. Nous avons tracé les variations de la distance d'arrêt maximale normalisée en fonction de l'énergie cinétique initiale de l'avalanche pour chaque expérience de laboratoire et pour le cas échelle 1 du Ryggfonn (Figure 32)

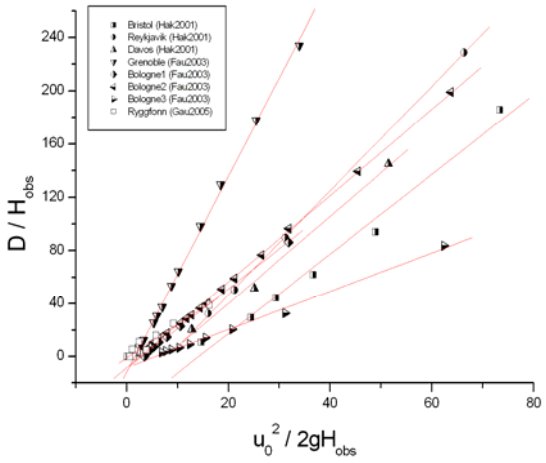

Figure 32. *Distance d'arrêt maximale de l'avalanche normalisée en fonction de l'énergie cinétique incidente normalisée de l'avalanche. Ensemble des données obtenues sur différents dispositifs expérimentaux de laboratoire et sur le couloir d'avalanche du Ryggfonn.*

Un résultat très intéressant est que, *dans la gamme de hauteurs d'obstacle et de vitesse incidente testées, la distance d'arrêt normalisée varie linéairement avec le carré du nombre de Froude de l'obstacle*, aussi bien sur les expériences de laboratoire (modèles réduits) que sur les mesures au Ryggfonn (échelle naturelle) :

$$\frac{D}{H} = \alpha \frac{u_0^{\,2}}{2gH} + \beta$$

où α et β sont les coefficients obtenus par régression linéaire sur les données expérimentales.

Ce résultat peut être interprété simplement par le bilan énergétique suivant :

$$\mu_\theta g D = \frac{u_0^{\,2}}{2} - \lambda g H$$

où (i) $\mu_\theta g D$ est l'énergie dissipée par frottement diminué du travail des forces de pesanteur ($\mu_\theta = \mu\cos\theta - \sin\theta$) ; (ii) $\frac{u_0^{\,2}}{2g}$ est l'énergie cinétique initiale de l'avalanche ; (iii) $\lambda g H$ est la réduction d'énergie cinétique due à l'obstacle. λ étant le rapport de l'énergie dissipée par l'obstacle à l'énergie potentielle de la digue gH_{obs}.

En identifiant la formulation empirique à l'équation du bilan énergétique, on obtient une interprétation « plus physique » des coefficients de calage α et β : $\alpha = \frac{1}{\mu_\theta}$ et $\beta = -\frac{\lambda}{\mu_\theta}$

Cette analyse nous permet de regrouper l'ensemble des données expérimentales sur une même droite, ce que montre la figure suivante où est tracée $\mu_\theta \frac{D}{H}$ en fonction de $\frac{1}{2} Fr_{obs}^{\,2} - \lambda$.

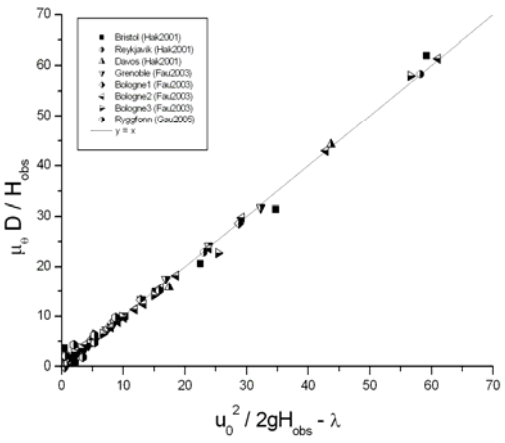

Figure 33. *Loi d'échelle sur la réduction de la distance d'arrêt après calage des coefficients α et β.*

Un « cas limite » intéressant est celui correspondant à l'avalanche de référence (sans obstacle) le bilan énergétique est le suivant ($D=d_0$ et $H=0$) :

$$\mu_\theta^0 g d_0 = \frac{u_0^2}{2}.$$

où μ_θ^0 est le coefficient de friction correspondant à l'avalanche de référence. On suppose a priori qu'il est différent du coefficient de friction $\mu_\theta=1/\alpha$ obtenu expérimentalement. Connaissant la distance d'arrêt de référence dans les expériences de laboratoire, on peut déduire la valeur de μ_θ^0. Ce travail ne peut pas être réalisé pour les données du Ryggfonn puisque l'on ne connaît pas en détails l'événement de référence et particulièrement sa distance d'arrêt maximale (des simulations numériques pourraient être envisagées pour l'écoulement de référence). On peut vérifier pour un bon nombre d'expériences, excepté le cas des expériences concernant des écoulements à nombre de Froude faible (régime « lent », Grenoble), que le coefficient μ_θ^0 est égal à μ_θ, ce que montre la . Le cas particulier des avalanches à nombre de Froude faible analysé dans [FAU 03] est discuté plus bas (Cf. cas particulier du régime « lent » décrit plus bas).

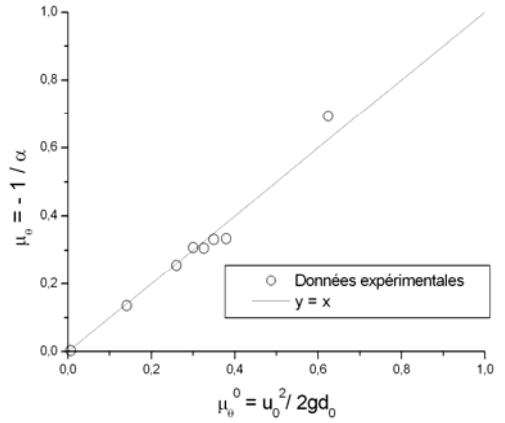

Figure 34. *Coefficient de frottement issu de la régression linéaire sur les données concernant la réduction de la distance d'arrêt ($1/\alpha$) en fonction du coefficient de frottement calculé sur l'évènement de référence.*

Dans la gamme où le comportement linéaire est valide (*en pratique lorsqu'une partie significative de l'avalanche déborde la digue*), la réduction de la distance d'arrêt varie donc linéairement avec le rapport de la hauteur de l'obstacle à la hauteur de référence selon la loi d'échelle suivante :

$$\frac{D}{u_0^2 \big/ 2g\mu_\theta} = \frac{D}{d_0} = 1 - \alpha_{rr} \frac{H}{h_0}$$

où $\alpha_{rr} = \frac{2\lambda}{Fr^2}$ est un coefficient de proportionnalité permettant de calculer le risque résiduel (correspondant ici à la distance parcourue par l'avalanche au delà d'une digue d'arrêt en cas de débordement).

Nous avons calculé le coefficient α_{rr} dans le cas des expériences de laboratoire (ce n'est pas possible dans le cas des expériences réalisées au Ryggfonn où la hauteur de référence de l'écoulement n'est pas connue). Ce coefficient est constant (λ est proportionnel au carré du nombre de Froude) pour l'ensemble des résultats obtenus en laboratoire. Dans le cas où un volume significatif de l'avalanche déborde au delà de l'obstacle, la perte d'énergie provoquée par l'obstacle (de hauteur H_{obs}) pourrait donc être formulée comme suit :

$$\Delta E = \lambda g H_{obs} = \alpha_{rr} \frac{u_0^2}{2} \frac{H}{h_0}$$

où α_{rr} est un coefficient de perte d'énergie, dépendant a priori de plusieurs paramètres : nature du matériau en écoulement, conditions de rugosité, forme de l'obstacle. Pour des écoulements granulaires secs non cohésifs sur fond rugueux interagissant avec un mur vertical, ce coefficient est de l'ordre de 0,14.

Cas particulier du régime « lent »

Dans le cas particulier du régime lent, les expériences de laboratoire montrent que la réduction de la distance est entièrement déterminée par la réduction de volume (stockage à l'amont de l'obstacle) par la formule simple suivante :

$$\frac{D}{d_0} = \left(1 - \frac{V_s}{V}\right)^{1/3}$$

où V_s est le volume stocké en amont de l'obstacle pouvant être estimé comme suit : $V_s = \frac{1}{2}\lambda_{fz} LH$ où L est la longueur du dépôt en amont de l'obstacle calculée comme cela est décrit dans la section 3.2.1.3.

Exemples

Cette section décrit deux exemples de calcul concernant la réduction de la distance d'arrêt.

Trois paramètres sont fixés:

- Le volume initialement mis en jeu : V=100 000m^3
- La largeur de la zone d'écoulement: λ_{fz}=100m.
- La pente en amont de l'obstacle : θ=15°.

Les paramètres, qui sont variés, sont:

- L'angle de dépôt de la neige θ_0
- La vitesse d'écoulement u_0 et la hauteur d'écoulement h_0

Exemple 1: Ici nous considérons une avalanche de référence de hauteur h=1m et de vitesse incidente u=40m/s. Cela correspond à une avalanche très rapide de neige sèche et froide.

Dans ce cas, le nombre de Froude est 12,8. La valeur retenue pour α_{rr} est 0.14 (valeur issue des écoulements granulaires secs non cohésifs en laboratoire). La pente du dépôt à l'amont θ_0 est négative (valeur négative correspondant à une avalanche rapide de neige sèche et froide, ne laissant donc peu de dépôt à l'amont de l'obstacle). On peut vraisemblablement utiliser la loi linéaire simple obtenue en régime inertiel. Les résultats en termes de réduction de la distance d'arrêt sont reportés sur la Figure 35. Ces résultats indiquent qu'une hauteur de digue égale à la hauteur de l'écoulement incident peut réduire la distance d'arrêt de l'ordre de 15%, et qu'une digue de hauteur deux fois supérieure peut réduire la distance d'arrêt de 30%. Il faut garder à l'esprit que la valeur de α_{rr} a été obtenue pour des écoulements granulaires secs non cohésifs en modèles réduits et n'est peut être pas représentative de la neige dense sèche et froide. Plus la hauteur de l'obstacle est grande, plus l'erreur sur le risque résiduel sera importante. C'est pourquoi nous n'avons pas tracé la courbe jusqu'à la hauteur critique ($H=H_c$) correspondant à D=0 car, vu les incertitudes sur α_{rr}, cette loi simple ne doit être pas utilisée pour estimer la hauteurs H_c.

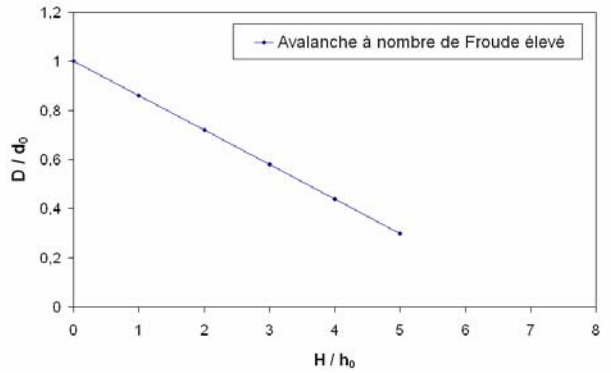

Figure 35. *Exemple d'une avalanche à nombre de Froude élevé. Réduction relative de la distance d'arrêt en fonction de la hauteur de la hauteur de la digue normalisée (Fr=12,8)*

Exemple 2: Ici nous considérons une avalanche de référence de hauteur h=4m et de vitesse incidente u=10m/s. Cela correspond à une avalanche plus épaisse et moins rapide que dans l'exemple précédent.

Dans ce cas, le nombre de Froude incident est 1,6. L'angle de dépôt amont est θ_0=10° (valeur plus élevés que dans le cas précédent qui pourrait correspondre à une avalanche plus lente composée de neige humide). On peut vraisemblablement considérer le cas particulier du régime « lent ». Dans ce cas la réduction de la distance d'arrêt est déterminée par la réduction de volume. Les résultats en termes de réduction de la distance d'arrêt sont reportés sur la Figure 36.

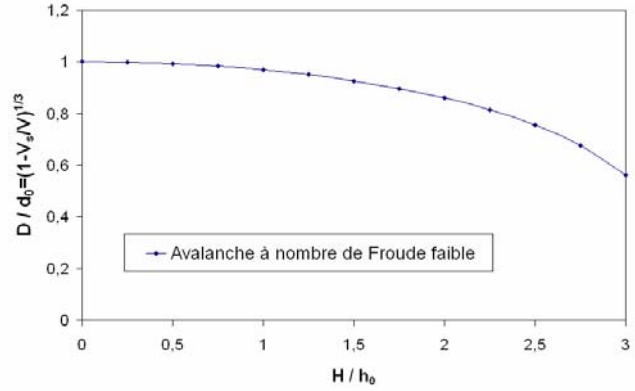

Figure 36. *Exemple d'une avalanche à nombre de Froude faible. Réduction relative de la distance d'arrêt en fonction de la hauteur de la hauteur de la digue normalisée (Fr=1,6)*

Extension possible à des géométries plus complexes

Zones d'écoulement ouvertes (3D)

L'écoulement est supposé canalisé (2D) dans les résultats présentés ci-dessus. Si la zone d'écoulement est ouverte (3D), il est recommandé de tenir compte des effets suivants:

- Le volume V_s doit être calculé comme il est recommandé dans la section 3.2.1.3.
- Le coefficient α_{rr}(3D) est supposé être supérieur au coefficient α_{rr}(2D) du fait des dissipations d'énergie dues à l'étalement latéral, conduisant a priori à une réduction plus importante de la distance d'arrêt.

Digue non verticale (DNV)

- Le volume stocké à l'amont de la digue doit être calculé en tenant compte de l'inclinaison de la face amont de la digue comme il est recommandé dans la section 3.2.1.3;
- Le coefficient α_{rr}(DNV) est a priori inférieur au coefficient α_r(DV).

3.2.2.2 Tas freineurs et comparaison avec les digues

Résultats issus des modèles réduits de laboratoire

Les expériences de laboratoire ont été réalisées dans un canal de 9 m de longueur constitué de deux parties. La pente de la partie haute était de 45° et celle de la partir basse était d'environ 10°

Une rangée de tas était située dans la partie basse, 15 cm en aval du haut de la partie basse. Les digues avaient des hauteurs de 2.5, 3, 5 et 10 cm et des largeurs de 5, 10 et 15 cm, avec une face amont perpendiculaire au fond du canal. Des particules de verre sphériques ont été utilisées pour générer des avalanches granulaires dans le cadre des expériences.

Dans chaque expérience, une quantité finie de particules était lâchée depuis le haut du canal. L'écoulement dans le canal a été filmé à l'aide d'une caméra et analysé, et l'extension et la forme du dépôt de l'avalanche, moyennée sur la largeur du canal, ont été mesurées. Les expériences avec les tas et les digues ont été comparées à un écoulement de contôle (écoulement de référence), où aucun obstacle n'obtruait la zone d'arrêt. Les expériences sont résumées dans le Tableau 4.

Expériences	Hauteur [cm]	Largeur [cm]	Espacement [cm]	Extension relative
Digue de faible hauteur	2.5	-	-	0.92
Digue normale	5	-	-	0.67
Digue de forte hauteur	10	-	-	0.54
Tas "référence"	5	10	6	0.77
Tas étroits	5	5	3	0.67
Tas de faible hauteur	2.5	5	3	0.86
Tas de forte hauteur	10	15	10	0.69
Deux rangées	5	10	6	0.63
Tas coniques	5	10	0	0.84

Tableau 4. *Résumé des expériences réalisées. En plus des dimensions des tas et des digues, la dernière colonne donne l'extension maximale relative, comparée au cas des expériences de contrôle (sans obstacle).*

Pour les digues, la distance d'arrêt décroît plus on augmente la hauteur de la digue. Par contre, l'augmentation de la hauteur des tas n'affecte plus la distance d'arrêt, au delà d'un certain seuil (H/h=2). Pour des hauteurs d'obstacle et d'écoulement du même ordre (H/h=1), les tas sont plus efficaces en terme de réduction de l'extension de l'avalanche que les digues. Les expériences montrent aussi qu'une rangée de tas (dans la configuration la plus efficace) réduit de 30% la distance d'arrêt, ce qui correspond à la réduction générée par une digue de même hauteur. Il est intéressant de noter que la forme la plus traditionnelle des tas, c'est-à-dire les tas coniques, est la moins efficace des configurations et que deux rangées de tas ne sont pas aussi efficaces que ce que l'on pourrait espérer par rapport à une rangée unique.

Recommandations en regard de la géométrie et de l'arrangement des tas

Les expériences en canal réduit avec des matériaux granulaires ont été réalisées conduisent aux recommandations suivantes pour la géométrie des tas freineurs contre les avalanches :

- La hauteur des tas, H, (hauteur effective au-dessus du manteau neigeux) devrait être 2-3 fois supérieure à l'épaisseur de l'écoulement dense. Augmenter la hauteur des tas au delà de ce seuil ne conduit pas un gain significatif en terme de réduction de la distance d'arrêt d'après les tests de laboratoire.
- La face amont des tas devrait être plutôt raide. Pour des tests expérimentaux en canal avec des particules de verre, un angle α=60° était suffisant alors qu'une face amont plus raide conduisait à une augmentation peu significative des dissipations d'énergie. Ce résultat n'est peut-être pas adapté au cas des avalanches de neige naturelles du fait des propriétés physiques différentes des matériaux.
- Le nombre d'aspect, ratio entre la hauteur des tas et l'aire de recouvrement au sol, H/B, devrait être voisin de 1 pour une efficacité optimale.
- Les tas devraient être placés avec une inter distance faible et des faces amont raides, de telle manière que les tas en aval interagissent effectivement avec l'écoulement. Plusieurs tas étroits sont plus efficaces que peu de tas larges à recouvrement de surface égal.

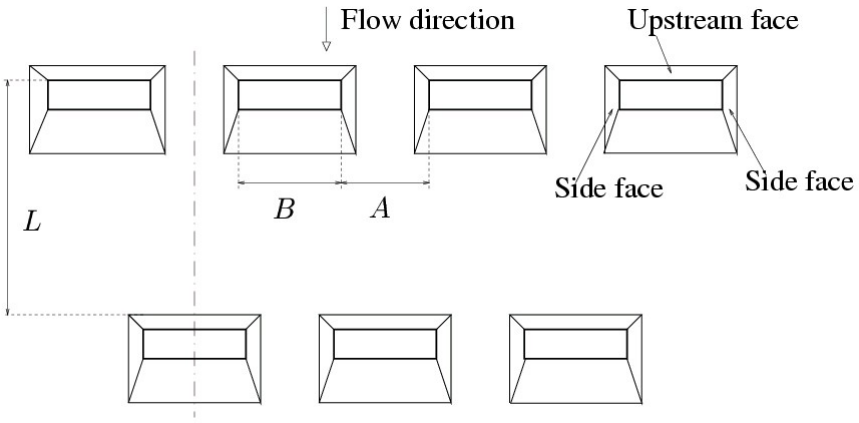

Figure 37. *Plan schématique de deux rangées de tas en quinconce. La distance horizontale minimale entre les deux rangées, L, est estimés selon la méthode décrite dans la section 3.2.1.2. B est la surface au sommet du tas et A est la distance entre les sommets des deux tas. A devrait aussi petit que possible et B devrait être similaire à la hauteur des tas H.*

Une seconde rangée de tas devrait être placée en quinconce par rapport à la première rangée en amont dans le cas où il y a suffisamment d'espace pour la construction d'une seconde rangée (Figure 37). Comme discuté dans la section suivante, l'effet freineur de la seconde rangée est supposé inférieur à l'effet de la première rangée bien que cela n'est pas bien mis en évidence par les expériences disponibles [HAK 2001].

Effet freineur

Dans le dimensionnement des mesures de protection à Neskaupstaður (Figure 1), il a été supposé que, après avoir impacté la rangée de tas, la vitesse de l'avalanche serait réduite approximativement de 20%. Ce choix a été fait sur la base des recommandations suisses en termes de dimensionnement [SAL 87] [VOE 55] et sur la base des expériences avec les ouvrages hydrauliques de dissipations. L'objectif des expériences en canal réduit avec

des matériaux granulaires réalisées pendant et après le dimensionnement des tas à Neskaupstaður était, en plus de trouver la configuration géométrique optimale, d'obtenir des résultats quantitatifs sur la dissipation d'énergie générée par les tas pour des matériaux granulaires afin de fournir des indications concernant l'effet freineur des tas pour les avalanches de neige naturelles.

Il y a de nombreuses difficultés techniques associées à la mesure directe de la vitesse d'un écoulement granulaire en canal, en particulier la vitesse de l'écoulement en aval du point d'impact du jet avec le sol. Dans la plupart des expériences, la réduction de vitesse n'a pas été mesurée directement. On a plutôt cherché à mesurer l'effet freineur par la réduction de la distance d'arrêt (réduction de la distance d'arrêt maximale et réduction de la distance d'arrêt du centre de masse).

La configuration la plus efficace d'une rangée de tas avec des hauteurs 2 à 3 supérieures à l'épaisseur d'écoulement conduisait, dans les expériences en canal de longueur 3, 6 et 9m, à une réduction de distance d'arrêt de l'ordre de 30% aussi bien avec des billes de verre qu'avec du sable [HAK 2001]. La réduction de la distance d'arrêt du centre de masse correspondante était plus importante de l'ordre de 40-50%. La réduction de l'extension maximale pour deux rangées de tas était de l'ordre de 40-50% pour les expériences en canal de 3 et 6 m, et la réduction correspondant au centre de masse supérieure à 50%.

La réduction relative de distance d'arrêt a été interprétée comme une réduction relative d'énergie cinétique en supposant la décélération de l'avalanche dans la zone d'arrêt était due principalement au forces de frottement, entre le sol et les particules en écoulement, approximativement égales au poids de l'écoulement (loi de Coulomb). Une réduction de distance d'arrêt de l'ordre de 30% (maximale) à 40-50% (centre de masse) correspond alors à une réduction de vitesse de l'ordre de 15-30% par une rangée unique de tas. Pour deux rangées de tas, une réduction de 40-50% ou plus correspond à une réduction de vitesse de l'ordre de 20-30% ou plus.

Cette interprétation de la réduction de la distance d'arrêt en termes de réduction de vitesse est tellement approximative qu'il n'est pas possible de dire si il est approprié d'utiliser la réduction relative de la distance d'arrêt maximale ou du centre de masse.

La vitesse de l'avalanche a été directement mesurée dans les expériences avec de la neige dans le canal de 34 m de longueur du Weissfluhjoch [HAK 2003a] : vitesse juste en amont des tas (u_0) et la vitesse après l'impact du jet avec le sol (u_4) (Figure 28). La vitesse de l'avalanche de référence (en absence de tas) au point d'impact du jet (u_{cont}) pouvait également être estimée. Il y a de fortes incertitudes sur les mesures de vitesse et d'épaisseur d'écoulement au Weissfluhjoch, mais les résultats indiquent que le ratio u_4/u_{cont} est égal à environ 0.8 pour des tas de hauteur 1,3 fois plus grande que l'épaisseur d'écoulement.

Bien que les résultats disponibles peuvent être interprétés différemment ils indiquent que les tas freineurs ont un effet significatif de freinage sur les écoulements granulaires supercritiques. De plus, l'effet freineur observé semble être conservé quelque soit l'échelle des modèles réduits dans les gammes de vitesse testées (longueurs des canaux variant de 3 à 34 m et vitesse d'écoulement variant de 2.6 à 7.5 $m.s^{-1}$). Ici *il est recommandé que la réduction relative de vitesse générée par une rangée de tas que l'on doit retenir, en fonction des recommandations données plus haut, est estimée à 20%.* Il n'est pas possible de spécifier en détails comment les dissipations d'énergie engendrées par les tas se distribuent entre l'impact initial avec le tas, l'interaction entre les jets, la résistance de l'air et l'énergie perdue à l'impact avec le sol. Cela dépend surtout de la pente et de la forme du terrain où les tas sont implantés. Par souci de simplification, il est recommandé de faire l'hypothèse que la réduction de vitesse est appliquée localement au point d'impact avec la face amont de l'obstacle dans des simulations numériques concernant une avalanche sans obstacle (loi de perte de charge locale). Ce résultat est bien évidemment valable seulement si les tas sont implantés dans la zone d'arrêt. Dans des pentes plus raides, les résultats obtenu en termes de dissipations ne seraient pas raisonnables (l'écoulement reprend de l'énergie en aval de l'obstacle dans les pentes raides), mais ce n'est pas une restriction importante vu que les tas doivent toujours être implantés dans la zone d'arrêt.

Les résultats expérimentaux montrent qu'une seconde rangée de tas a moins d'effet sur la vitesse incidente de l'écoulement incident. Ce résultat est aussi indiqué par les expériences en hydraulique [PET 84]. Ici *il est recommandé de considérer qu'une seconde rangée de tas est supposée réduire la vitesse de l'avalanche de 10% en plus de la réduction de 20% générée par la première rangée.*

Il est nécessaire de souligner que les recommandations ci-dessus sont basées sur des connaissances encore incomplètes de la dynamique des avalanches granulaires interagissant avec des obstructions. Néanmoins, nous pensons que les tests en modèles réduits et les recommandations qui en découlent fournissent des indications utiles pour les praticiens en charge du dimensionnement des structures dissipatives d'énergie contre les

avalanches de neige en l'absence de données bien documentées à des échelles plus grandes et de mesures sur des avalanches naturelles.

3.3 Limitations des résultats issus des modèles réduits

Il faut bien garder à l'esprit que les recommandations concernant l'efficacité des différents ouvrages interagissant avec une avalanche ont été obtenus à l'aide de la modélisation physique en laboratoire sur des modèles réduits.

L'efficacité des digues et des tas a été analysée en modélisant les avalanches de neige par des écoulements granulaires de billes ou de sable, supposés être similaires à des avalanches réelles dans le sens où ces écoulement ont le même comportement qu'un écoulement hydraulique supercritique tant que le nombre de Froude est élevé (Fr ≈10) et du même ordre de grandeur pour les écoulements granulaires en modèles réduits et les écoulements de neige naturels. Le nombre de Froude est défini comme suit: $Fr = u/(gh)^{1/2}$, où u est la vitesse de l'écoulement, h est la hauteur de l'écoulement et g la gravité. Fr est le ratio de la vitesse moyenne de l'écoulement à la célérité des ondes de gravité (ou encore le ratio du carré de l'énergie cinétique au carré de l'énergie potentielle). Le nombre de Froude est défini de telle sorte que, pour des nombres de Froude supérieurs à 1, la vitesse de propagation des instabilités est plus petite que la vitesse de l'écoulement. Par conséquent, des obstacles placés dans l'écoulement ne génèrent pas d'instabilités à l'amont. De tels écoulements sont appelés écoulements supercritiques. Bien qu'il y ait des preuves expérimentales de comportements similaires par comparaison d'expériences à différentes échelles, l'application des résultats issus des modèles réduits de laboratoire à des échelles plus grandes et à des avalanches de neige réelles impliquant de la neige et non pas un matériau granulaire sec et non cohésif, reste une question ouverte.

Les modèles physiques sont basés sur l'utilisation de matériaux granulaires secs et non cohésifs. Les avalanches de neige ne sont pas, en général, des écoulements non cohésifs de matériaux granulaires. Les propriétés de la neige en écoulement peuvent varier dans une large gamme du fait des conditions climatiques agissant sur le manteau neigeux avant le départ de l'avalanche. Cette remarque doit gardée à l'esprit et nous rappeler les limitations pour appliquer directement les résultats des modèles réduits de laboratoire avec des granulaires à l'échelle réelle des avalanches de neige.

De plus, la topographie des couloirs d'avalanches et des zones d'arrêt a été simplifiée de manière importante dans les modèles réduits. Le couloir d'avalanche a été modélisé par une zone d'écoulement incliné avec une surface lisse ou rugueuse. En parallèle, la zone d'arrêt a été modélisée par un plan de surface lisse ou rugueuse, à faible pente. Les couloirs d'avalanches réelles et les zones d'arrêt ont généralement une topographie complexe, pouvant impliquer par exemple, une série de biefs plus au moins sinueux, avec des pentes et des rugosités (roche, végétation,…). Tous ces facteurs contribuant au comportement complexe des avalanches de neige naturelles ont été négligés en simplifiant la topographie. De manière similaire, ces remarques sont également valables pour les géométries d'obstacle testées.

Fondamentalement, les expériences en modèles réduits fournissent une meilleure connaissance du comportement générique des avalanches de neige naturelles caractérisées par un même nombre de Froude et avec des configurations géométriques simplifiées (couloir, zone d'arrêt, obstacle)

A partir des similitudes, on peut conclure que l'interaction d'une avalanche granulaire en laboratoire avec des obstacles est une version réduite d'une avalanche réelle interagissant avec des obstacles. Cependant, seul le comportement générique est capturé par les expériences en laboratoire. Les résultats ne peuvent pas être directement appliqués à des problèmes pratiques réels. Des facteurs exclus des considérations expérimentales en laboratoire telles que la topographie ou les propriétés de la neige peuvent conduire à une déviation du comportement des avalanches de neige réelles par rapport au comportement observé en laboratoire.

3.4 Exemple d'application de modèles numériques

3.4.1 Introduction

La pertinence du passage des expérimentations à échelle réduite aux dispositifs grandeur nature reste une question ouverte. En effet trois limites apparaissent :

- Le matériau utilisé : il s'agit, la plupart du temps, de matériau granulaire et non de neige
- L'échelle : les expériences sont réalisées sur des modèles réduits.

- La configuration de l'expérience : les modèles réduits sont de forme géométrique simple et l'écoulement est dense (alors que dans la nature deux couches peuvent apparaître).

Ainsi, l'efficacité négligeable d'un dispositif de protection observée à échelle réduite laisse à penser que l'on obtiendra un comportement semblable pour de la neige à l'échelle 1. Cependant, une efficacité prouvée sur un modèle réduit ne s'appliquera pas forcement aux avalanches de neige du fait de la différence de type écoulement et d'échelle : la compression de la neige lors de l'impact avec l'obstacle ou encore l'écart de densités entre le fluide et les particules ne sont pas reproduits lors des expérimentations sur modèles réduits. Quoiqu'il en soit, ces expérimentations peuvent être utiles pour identifier certains comportements ne dépendant pas du matériau ou de l'échelle, et constituent de fait un outil fort utile pour les concepteurs de dispositifs paravalanche.

Néanmoins, pour l'étude de dispositifs complexes, l'utilisation de la modélisation numérique tend à s'imposer. En effet, si la première question relative aux lois de comportement de la neige reste posée (des modèles empiriques et/ou des lois de comportement de matériau modèle (matériau granulaire) sont utilisés au sein des modèles numériques), les limitations relatives à l'échelle et à la configuration de l'expérience peuvent être contournées par l'utilisation de modèles numériques. Ainsi, dans le paragraphe qui suit, nous présentons un exemple d'application d'un modèle numérique permettant de résoudre les équations de conservation moyennées sur l'épaisseur de l'écoulement et dans lesquelles un modèle d'érosion et dépôt est implémenté [NAA 2003] [FAU 2003b]. Il s'agit de l'avalanche mixte (partie dense surmontée d'une partie poudreuse) qui s'est produit en février 1999 sur le site de Taconnaz, site présentant un dispositif de défense passive relativement complexe, alliant digue d'arrêt, digues déflectrices, tas freineurs et lames déflectrices.

3.4.2 Exemple de Taconnaz

L'avalanche de 1999 sur le site de Taconnaz est particulièrement intéressante car elle est d'une part particulièrement bien documentée et d'autre part, elle interagit avec un dispositif de protection complexe. Ce dispositif a été construit en 1991 et est constitué de 4 types d'ouvrage de protection passive. A la fin de la zone d'écoulement (c'est-à-dire au début de la zone de dépôt) on trouve (1) 11 dents déflectrices en béton destinées à disperser l'écoulement et à dissiper une part non négligeable d'énergie lors de l'impact (Figure 38). A l'aval sont positionnées 4 rangs de tas freineurs disposés en quinconce. Le but est là encore de dissiper l'énergie de l'avalanche (Figure 39). Puis deux digues latérales (Figure 40) ont été mises en place afin de contenir l'avalanche dans la zone de dépôt et éviter les débordements latéraux. Le dispositif, conçu initiallement pour contenir un dépôt de 700 000 m^3, se termine par une digue d'arrêt (Figure 40) destinée à stopper la partie dense de l'avalanche.



Figure 38. *Lames déflectrices sur le site de Taconnaz*



Figure 39. *Tas freineurs sur le site de Taconnaz.*

Durant les crues avalancheuses catastrophiques de l'hiver 1999, une importante avalanche mixte (avalanche dense surmontée d'une partie poudreuse) prenant naissance à proximité du glacier de Taconnaz s'est donc produite mobilisant plus de 800 000 m^3 de neige sèche. La partie dense a interagi avec le dispositif de protection alors que la partie poudreuse a poursuivi son chemin et traversé le village de Taconnaz sans toutefois entraîner de dommages notables. La quantité de neige impliquée dans la partie poudreuse a été estimée à 50 000 m^3. Bien que l'essentiel du dépôt dense ait été contenu à l'intérieur du dispositif de protection, une partie a débordé, notamment au niveau de la digue latérale droite (par rapport au sens de l'écoulement de l'avalanche). Une campagne de photogrammétrie aérienne a permis de déterminer de façon précise les hauteurs du dépôt sur une grille de 5 m * 5 m à l'intérieur du dispositif de protection (Figure 41). Puis, différentes visites de site par hélicoptère ont permis de localiser précisément la zone de départ et l'emprise du dépôt au niveau des débordements.

Dès lors, il a été possible de reproduire numériquement l'avalanche de Taconnaz grâce à la modélisation bicouche développée au Cemagref en utilisant les données issues du modèle numérique de terrain. La première étape a consisté à déterminer l'hydrogramme de l'écoulement (variation du débit en fonction du temps) à l'entrée du dispositif de protection. Le paramètre de frottement utilisé correspondait à de la neige froide et légère (paramètre ajusté à l'aide de l'avalanche de Montroc dans un couloir voisin). Connaissant la zone de départ, la topographie du couloir (modèle numérique de terrain à un pas d'espace de 5 m), et la quantité de neige (750 000 m^3) entrant dans le dispositif, le taux d'érosion de neige le long du couloir a pu être déterminé. Par la suite, une seconde simulation a été réalisée afin d'étudier l'écoulement à l'intérieur du dispositif de protection en utilisant un modèle numérique de terrain (MNT) présentant une meilleure définition (Δx=1m), les conditions d'entrée ayant été déterminées à partir de la première simulation. Les tas freineurs et les digues ont été représentées directement par l'intermédiaire du MNT. Les dents déflectrices, trop fines, ont été considérées comme murs imperméables en conditions limites. De la modélisation numérique de l'avalanche ont pu être tirés trois types de résultats : les caractéristiques générales de l'écoulement, la structure du dépôt et la localisation des débordements. La structure du dépôt à l'intérieur du dispositif a été comparée aux mesures obtenues lors des campagnes aériennes, ce qui a permis de constater que la forme des dépôts et les hauteurs de neige étaient relativement bien reproduites. Les débordements latéraux et frontaux simulés se sont également produits aux mêmes endroits que ceux observés (Figure 41). Ainsi, en dépit de la complexité du dispositif de protection, et de la simplicité relative du modèle utilisé, les résultats obtenus sont plutôt prometteurs. Ceci ne marque cependant pas la fin de nos efforts de recherche qui doivent désormais porter sur l'interaction entre écoulement et obstacles et processus de dépôts et d'érosion.

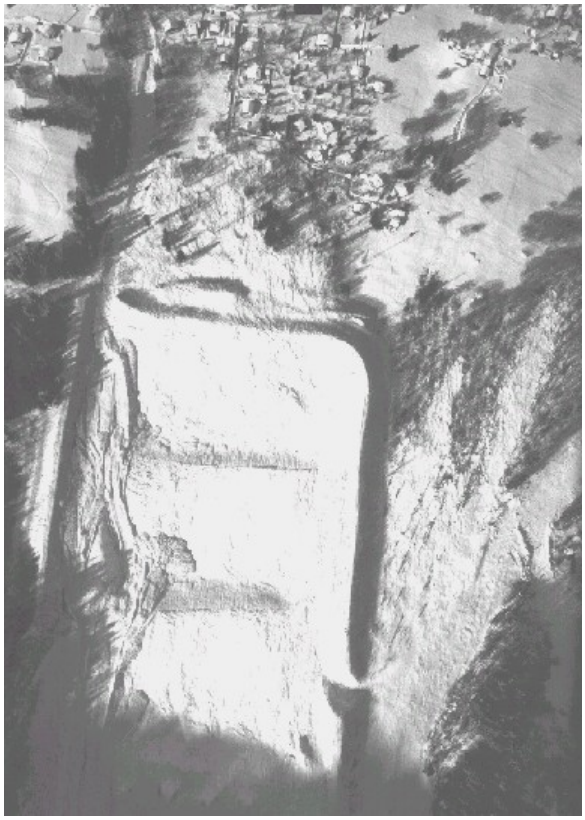

Figure 40. *Prise de vue aérienne du dépôt de neige sur le site de Taconnaz après l'avalanche de février 1999*

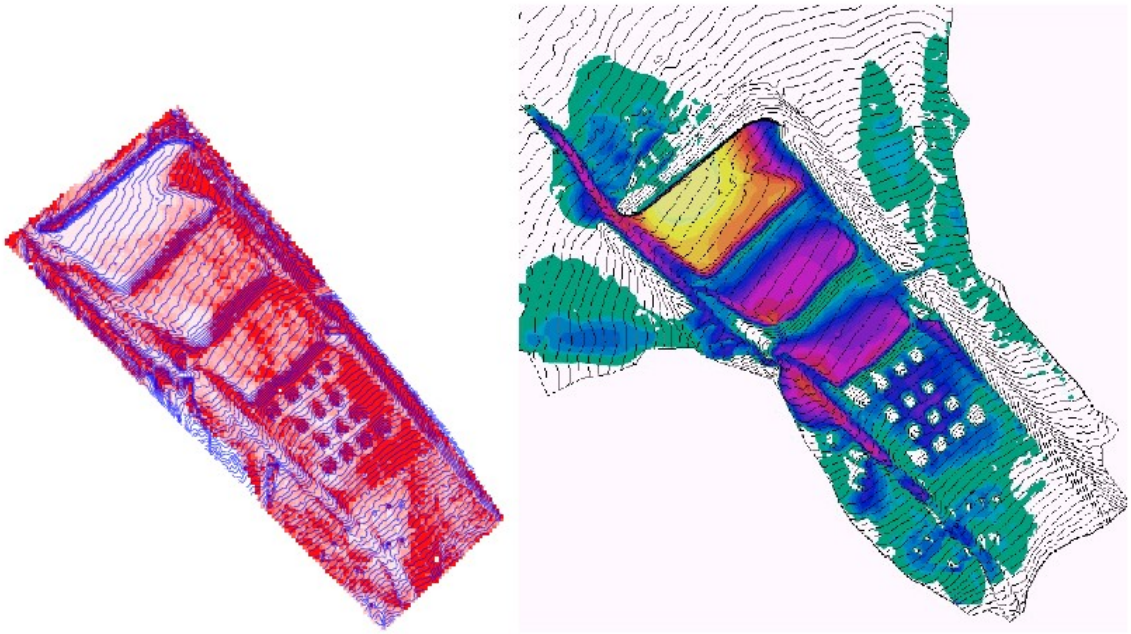

Figure 41. *Dépôt mesuré (image de gauche) et simulé (image de droite) dans le dispositif de Taconnaz après l'avalanche de février 1999.*

4 Avalanche de neige poudreuse et dispositifs de protection passive permanente

En dépit d'efforts significatifs, la dynamique des écoulements d'avalanches poudreuses reste mal connue du fait notamment du manque de données expérimentales in situ précises. Néanmoins des équipes en Norvège (site du Rygfonn), en Suisse (site de La Sionne) ou encore au Japon (site de Kurobe Canyon) ont réalisé des campagnes de mesures systématiques et obtenus des données valides. Cependant ces études ne s'intéressent pas à l'interaction avec des dispositifs de protection (une digue d'arrêt est placée dans la zone d'arrêt du couloir du Rygfoon mais seule l'interaction avec une avalanche dense a été étudiée). L'amélioration des connaissances dans ce domaine constitue cependant un point important pour les concepteurs d'ouvrages qui doivent déterminer l'efficacité de ces ouvrages. Il est clair que la meilleure solution serait l'observation in situ, mais pour les raisons précédemment invoquées, cela n'est pas toujours possible. Aussi, l'approche par simulation en laboratoire constitue-t-elle au jour d'aujourd'hui une bonne alternative : les expérimentations peuvent être répétées à l'infini et les conditions aux limites sont contrôlées. Par ailleurs, il y a deux autres avantages à réaliser des expériences de laboratoire :

- Il est possible d'obtenir des résultats applicables à l'échelle 1 même si il reste encore difficile de trouver une simulation appropriée
- Les expériences de laboratoire génèrent une base de données permettant de valider les approches numériques à partir d'un jeu de données précis.

4.1 Modélisation physique

4.1.1 Les différentes approches et les critères de similitude correspondants.

L'analyse des travaux scientifiques antérieurs montre trois approches possibles : des modélisations physiques d'avalanche poudreuse par un fluide lourd dans l'eau, par des particules dans l'eau et par des particules dans l'air.

Fluide lourd dans l'eau

Ainsi, 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 [HOP 77], et par la suite Beghin [BEG 91] 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 [BEG 91], 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 (9) et le rapport de densité entre fluide lourd et fluide ambiant (10) sont respectés.

$$\frac{U_r}{\sqrt{gH_r \frac{\Delta\rho_r}{\rho_{a\,r}}}} = \frac{U_m}{\sqrt{gH_m \frac{\Delta\rho_m}{\rho_{a\,m}}}} \qquad \textbf{9}$$

$$\frac{\Delta\rho_r}{\rho_{a\,r}} = \frac{\Delta\rho_m}{\rho_{a\,m}} \qquad \textbf{10}$$

où U (m.s^{-1}) est la vitesse du front, H (m) est la hauteur de l'écoulement, $\frac{\Delta\rho}{\rho_a}$ est la densité relative de l'avalanche avec ρ (kg.m^{-3}) densité de l'avalanche et ρ_a (kg.m^{-3}) densité du fluide ambiant. Les indices r et m représentent respectivement les écoulements réels et les écoulements modélisés.

Le respect simultané des critères 9 et 10 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, il est de l'ordre de 1,2 alors que dans le cas d'avalanches aérosol réelles, ce rapport est de l'ordre de 10. Par ailleurs, le choix de la solution saline implique que les résultats ne sont valables que pour des écoulements fortement inertiels caractérisés par un nombre de Froude élevé. Nous reviendrons au paragraphe suivant sur les équations et les hypothèses ayant conduit à l'obtention de ces critères de similitude, les expériences que nous avons menées étant basées sur ce concept. Il faut cependant dès à présent insister sur le fait que cette approche ne peut être utilisée que lorsque la sédimentation des particules joue un rôle marginal.

Particules dans l'eau

C'est pourquoi, Hermann et al. [HER 91] ont développé un modèle physique bi-phasique. Dans leurs travaux, l'avalanche de neige aérosol 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). Bien que cette modélisation soit plus proche de la réalité, il n'a pas été possible à Hermann de respecter le critère de rapport de densité, le fluide ambiant étant là encore de l'eau douce.

Particules dans l'eau

Enfin, Bouzhinsky [BOU 98] a expérimenté l'utilisation de particules solides dans l'air pour simuler les écoulements d'avalanches sur une maquette. Pour la partie poudreuse, cette tentative n'a pas donné de résultats intéressants ; les particules sédimentent rapidement et empêchent le développement et l'obtention d'un écoulement de suspension significatif.

4.1.2 Dispositif expérimental, instrumentation associée et critères de similitude

Le dispositif expérimental utilisé 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 (Figure 42). Les bouffées de gravité s'écoulent le long d'un plan incliné à partir d'un réservoir (0.2m*0.15m) de 4 l fermé par une vanne à ouverture instantanée. L'avalanche poudreuse est simulée par de l'eau salée mélangée avec du kaolin. Elle s'écoule dans un fluide ambiant plus léger, formé d'eau douce. La densité du fluide lourd 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 bidimensionnelles et tridimensionnelles sont ainsi réalisées. Dans le cas des avalanches bidimensionnelles, l'écoulement est confiné dans un canal (l = 2.85m, L=0.15 m, H=0.5 m). Dans le cas tridimensionnel, 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) puis avec un obstacle (Figure 43), représentant une digue d'arrêt, qui est placée perpendiculaire au plan incliné et à l'écoulement, à 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 bidimensionnel. Tous les essais sont réalisés pour une pente de 10° avec un volume initial de 2 l. La nature turbulente de l'écoulement implique de moyenner les résultats obtenus sur plusieurs expériences. Pour chaque cas, nous avons utilisé cinq expériences identiques, sur lesquelles on réalise des moyennes, moyennes qui sont représentées graphiquement par la suite. Il est nécessaire de préciser ici que la couche dite de saltation (couche à l'interface de la partie dense et la partie poudreuse) n'est pas modélisée.

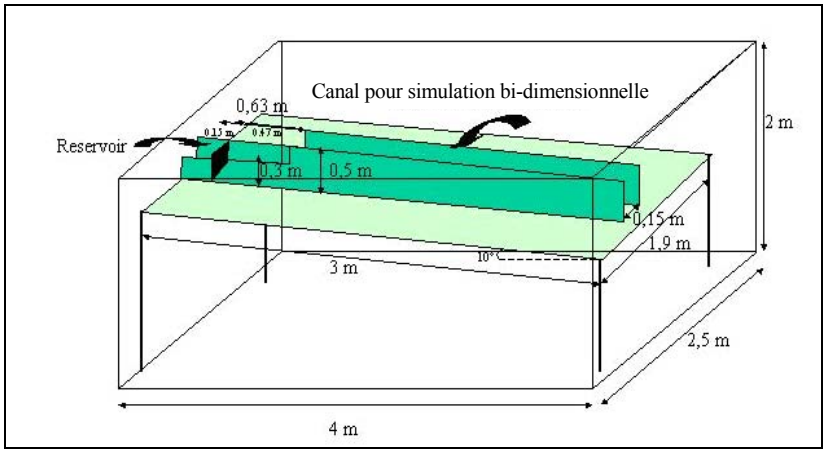

Figure 42. *Bassin noyé et canal submergé*

Deux caméras (de face et de côté) ont permis de déterminer la hauteur, la forme et la vitesse de front de l'avalanche. Le vélocimètre ultrasonique permet de déterminer la composante de la vitesse de l'écoulement suivant l'axe de la sonde. La vitesse est déterminée à 4 cm du capteur de façon à limiter les perturbations locales générées par le capteur. La zone de mesures est un cylindre de 10 mm de diamètre et 1 mm d'épaisseur. La Figure 43 montre un écoulement typique : l'obstacle qui obstrue toute la largeur du canal crée une accélération et une forte zone de cisaillement au dessus de l'obstacle, créant ainsi un vortex à l'aval de la digue.

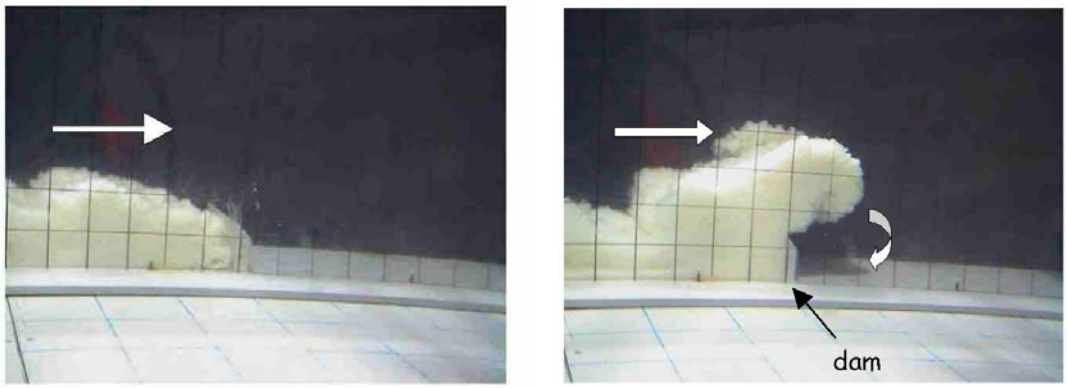

Figure 43. *Avalanche bidimensionnelle au droit d'une digue*

Les valeurs des critères de similitude obtenus pour l'avalanche réelle et l'avalanche simulée sont présentées dans le Tableau 5.

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

Tableau 5. *Valeurs des nombres adimensionnels en laboratoire et in-situ*

Comme indiqué précédemment, la similitude entre les avalanches poudreuses réelles et les avalanches poudreuses simulées est réalisée par le respect du nombre de Froude densimétrique. Le nombre de Reynolds, que ce soit in situ ou dans la cuve, est suffisamment important pour que l'écoulement soit considéré comme turbulent développé et donc indépendant du nombre de Reynolds. Cependant le rapport de densité varie d'un ordre de grandeur entre l'avalanche réelle et l'avalanche de laboratoire.

4.1.3 Principaux résultats

Le référentiel utilisé pour exploiter les résultats est le suivant :

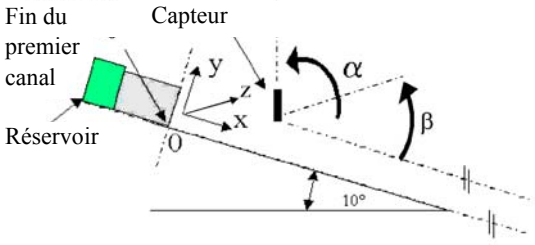

Figure 44. *Notation*

Avalanche de référence

Par la suite, on appellera vitesse horizontale la vitesse suivant l'axe x et vitesse verticale la vitesse suivant l'axe y.

En ce qui concerne l'avalanche de référence (c'est-à-dire l'avalanche sans obstacle), on observe que la vitesse horizontale à l'intérieur de la tête de l'avalanche (Figure 45) est supérieure à la vitesse de front de l'avalanche. Ainsi pour la configuration bidimensionnelle, le rapport U_{max}/U_{front} peut atteindre 1.6 mais dépend également de la hauteur (Figure 46). Pour la configuration tridimensionnelle, ce rapport diffère quelque peu et va jusqu'à atteindre 1.8 (Figure 47). La vitesse verticale peut atteindre 106% de la vitesse du front pour l'écoulement tridimensionnel et 74 % pour l'écoulement bidimensionnel (Figure 48 et Figure 49).

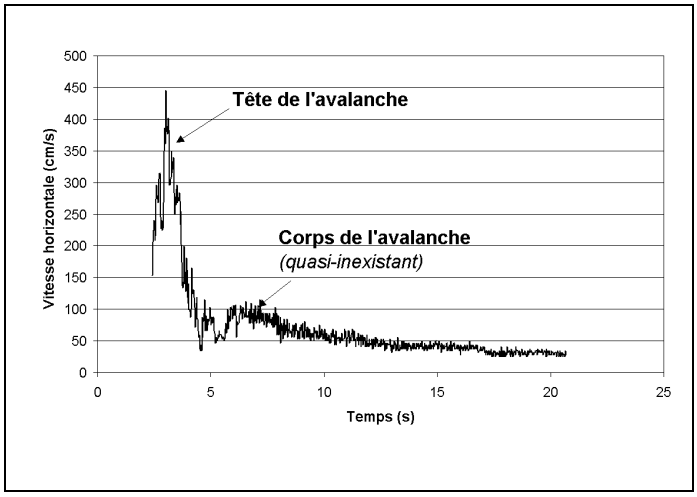

Figure 45. *Evolution de la vitesse en fonction du temps en point du canal - Valeurs moyennées sur 5 expériences pour la configuration 2D*

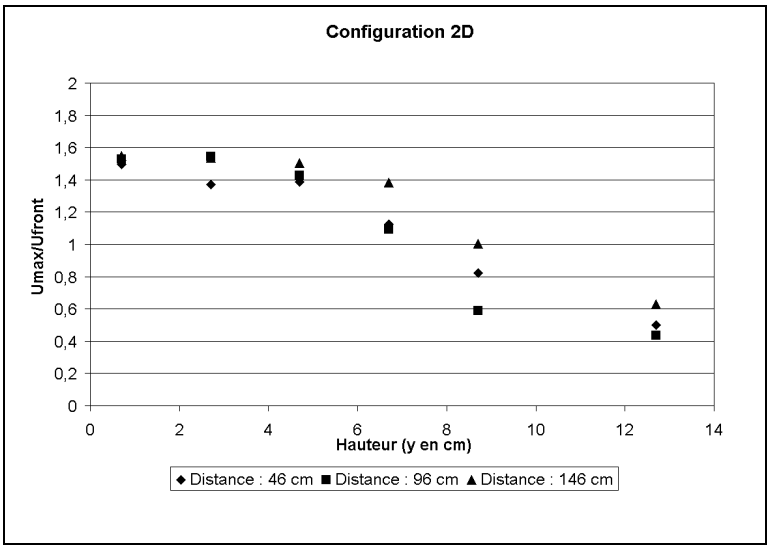

Figure 46. *Valeur de U_{max}/U_{front} en fonction de la hauteur pour différentes distances (simulation 2D)*

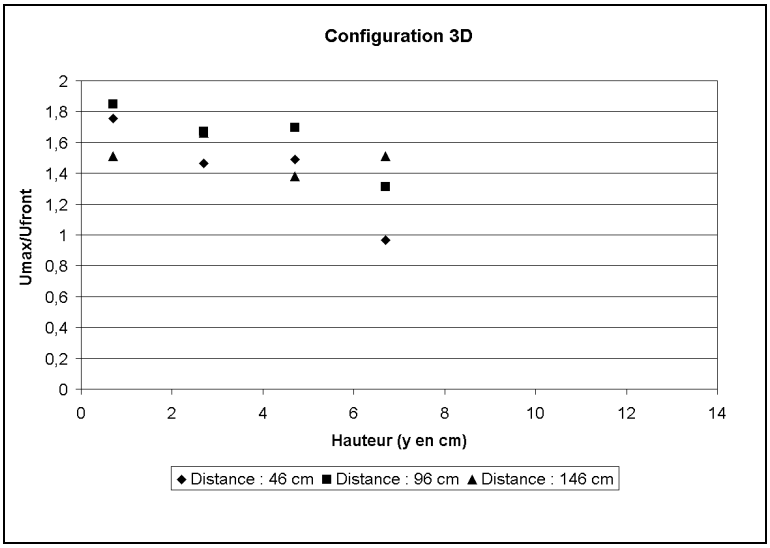

Figure 47. *Valeur de U_{max}/U_{front} en fonction de la hauteur pour différentes distances (simulation 3D)*

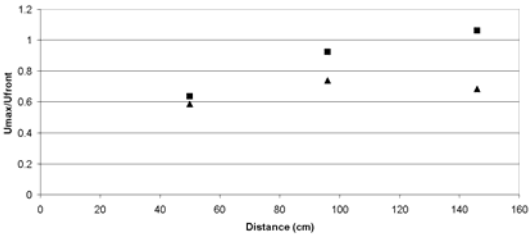

Figure 48. *Rapport entre la vitesse verticale positive maximale et la vitesse du front en fonction de la distance pour les simulations 2D (▲) et 3D (■)*

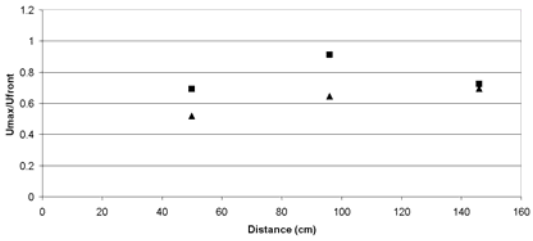

Figure 49. *Rapport entre la vitesse verticale négative maximale et la vitesse du front en fonction de la distance pour les simulations 2D (▲) et 3D (■)*

Digues d'arrêt

La mise en place de la digue entraine une diminution de la vitesse du front. Le résultat obtenu est sans surprise : plus la digue est haute, plus la réduction est importante (Figure 50 et Figure 51), plus on s'éloigne de la digue, moins son effet se fait sentir. Mais l'intensité de cette réduction dépend de la topographie : 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. Ces résultats correspondent à l'analyse de la vitesse de front ; or comme précédemment souligné, la vitesse maximale enregistrée au sein de la bouffée de densité diffère de la vitesse de front. Nous nous sommes donc 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 bidimensionnelle, ce rapport est une fonction croissante de la hauteur et peut atteindre une valeur de 1.9 (Figure 52). Ceci signifie que l'utilisation de la seule vitesse de front conduit à une surestimation de l'efficacité des digues. En fait, les vitesses sont plus redistribuées que réduites : dans les cas bi et tridimensionnels, la Figure 53 et la Figure 54 montrent 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.

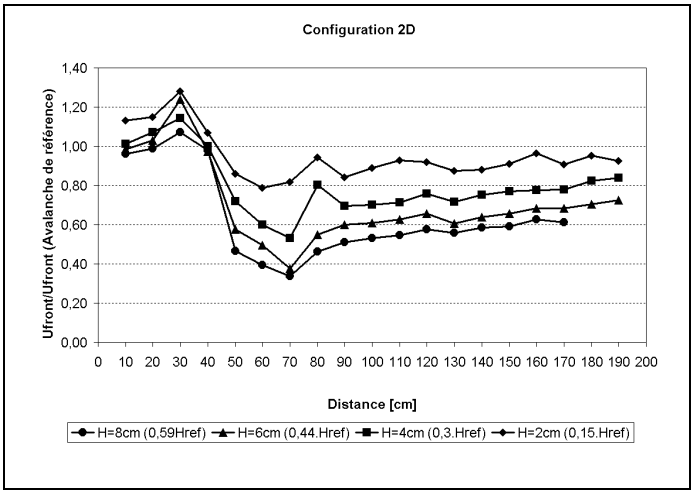

Figure 50. *Valeur de $U_{front}/U_{front,ref}$ en fonction de la distance pour différentes hauteurs de digue (simulation 2D)*

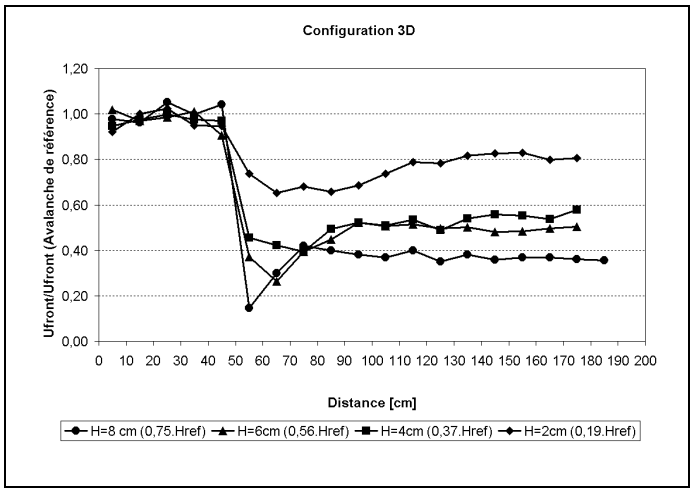

Figure 51. *Valeur de $U_{front}/U_{front,ref}$ en fonction de la distance pour différentes hauteurs de digue (simulation 3D)*

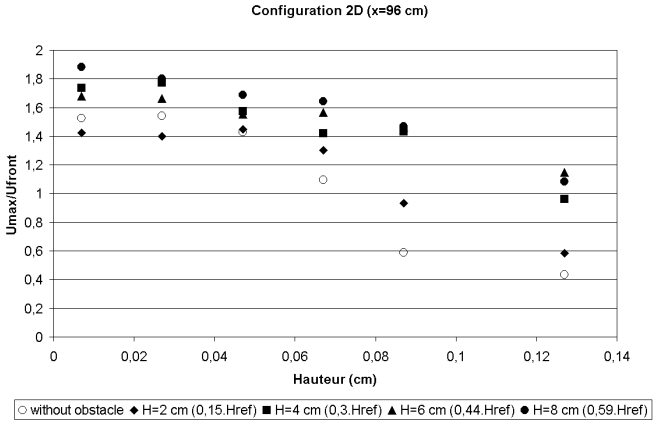

Figure 52. *Rapport entre la vitesse horizontale maximale et la vitesse de front en fonction de la hauteur pour la configuration bidimensionnelle*

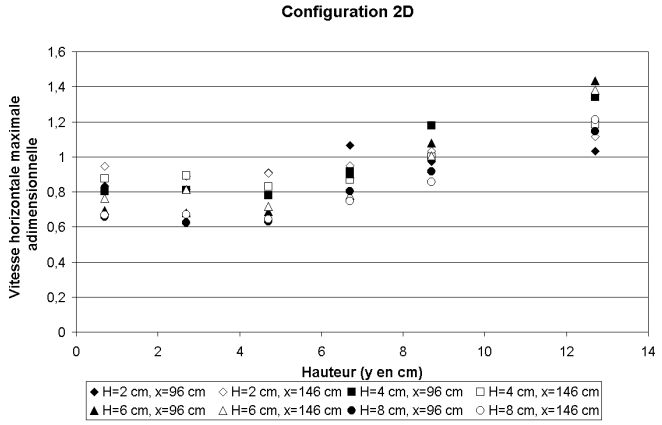

Figure 53. *Rapport entre les vitesses horizontales maximales avec et sans digue en fonction de la hauteur pour la configuration bidimensionnelle*

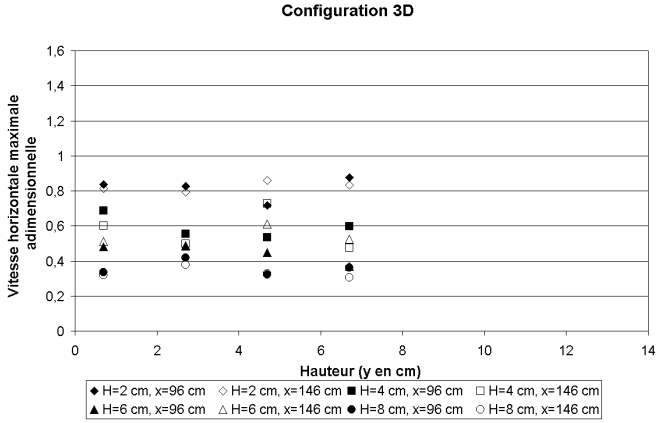

Figure 54. *Rapport entre les vitesses horizontales maximales avec et sans digue en fonction de la hauteur pour la configuration tridimensionnelle*

Les digues déviatrices

Tous les modèles utilisés ont une hauteur de 6 cm (soit 0,56 fois la hauteur de l'avalanche de référence) et 50 cm de long. Comme Beghin et Closet [BEG 90] avaient montré que les digues déviatrices centrées sur l'écoulement étaient plus efficaces, seule cette configuration a été étudiée. A la demande des concepteurs de dispositifs paravalanches,trois angles de déviation ont été testés : 15°, 30° et 45° (Figure 55).

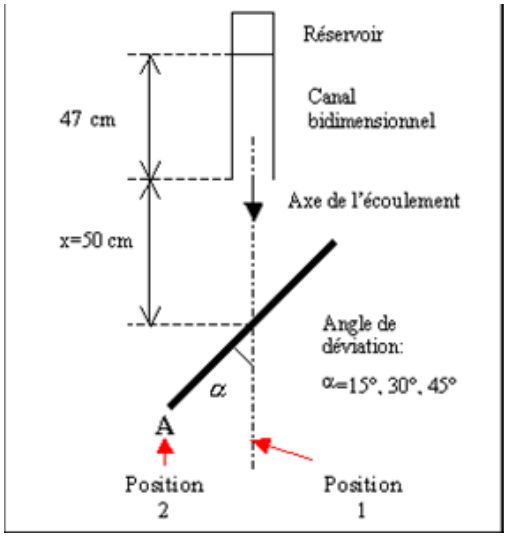

Figure 55. *Digue de déviation*

Dans le cas des digues déviatrices, lorsque la bouffée de densité vient heurter l'obstacle, une première partie de l'écoulement le franchit alors que la seconde est déviée suivant l'angle d'inclinaison (Figure 56). Tout comme dans le cas des digues d'arrêt, la perte de quantité de mouvement de l'avalanche est essentiellement due à l'impact avec l'obstacle puis avec le sol lorsque l'écoulement retombe en aval de l'obstacle. L'entraînement d'air au sein du jet maintient la quantité de mouvement plus ou moins constante : la vitesse est certes réduite mais la masse augmentant, l'ensemble conduit à une réduction de la pression au sein de l'écoulement.

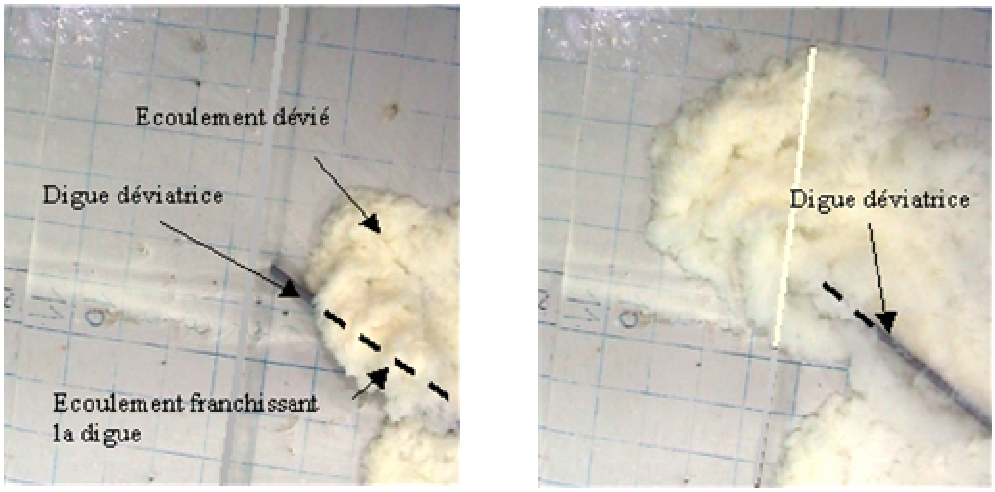

Figure 56. *Interaction entre une bouffée de densité et une digue déviatrice (angle de déviation de 30°)*

Dans le cas présent, étant donné que le volume de fluide qui franchit la digue est relativement faible, nous avons choisi de déterminer la vitesse du front de l'écoulement dévié. Les distances ont été corrigées afin de tenir compte de la direction de l'écoulement. Les résultats obtenus adimensionnalisés par la vitesse de l'avalanche de référence sont présentés sur la Figure 57. La présence de la digue déviatrice conduit à une augmentation de la vitesse de front le long de son axe, augmentation d'autant plus marquée que l'angle de déviation est important. Ce rapport peut ainsi atteindre une valeur de 1,8. Lorsque la bouffée de densité atteint l'extrémité aval du dispositif, on observe un étalement conduisant dès lors à une réduction de la vitesse du front, là encore d'autant plus marquée que l'angle de déviation est important. Néanmoins, la Figure 57 ne fait pas apparaître de

différences de comportement marquées entre les angles de déviation de 15° et de 30°. 70 cm en aval de la digue, lorsque se rejoignent les deux écoulements, on observe une accélération de la vitesse du front.

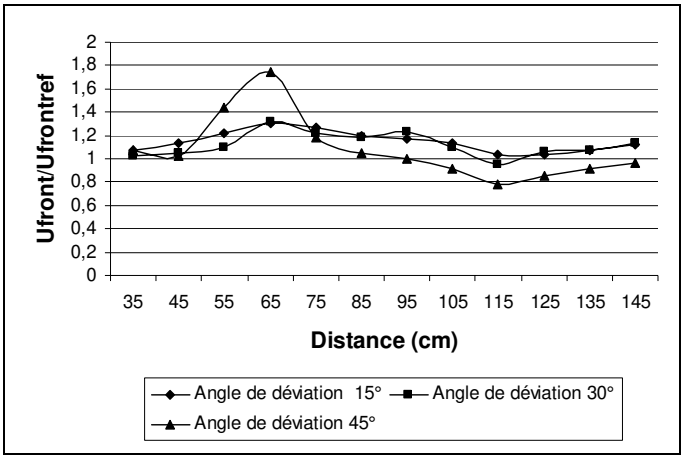

Figure 57. *Valeurs de Ufront/Ufrontref en fonction de la distance, pour différentes inclinaisons de la digue déviatrice*

Mais l'augmentation de la vitesse du front n'est pas représentative d'une augmentation de la quantité de mouvement. Comme observé dans le cas des digues d'arrêt, l'étude du rapport des vitesses maximales enregistrées au sein de l'écoulement semble plus adéquate (Figure 58). La comparaison doit être faite avec la position 2. Dans ce cas, la différence de comportement entre les angles de déviation de 15° et de 30° est plus marquée et la valeur du rapport ne dépasse jamais 1. Il ne faudrait pas conclure à la lecture de la Figure 57 que les digues déviatrices sont inefficaces : le rôle d'une telle digue déviatrice n'est pas de limiter la vitesse de l'écoulement de la partie déviée mais de celle franchissant l'obstacle. Cet effet peut être caractérisé par le rapport Umax/Umaxref à la position 1 (Figure 58). On note ainsi que pour des inclinaisons de 30° et 45° ce rapport atteint une valeur de 0,49 ce qui est similaire à celle obtenue pour une digue d'arrêt de même hauteur. Par contre, pour ce qui est de la vitesse verticale (Figure 59), les effets ou du moins les ordres de grandeur sont différents. Le maximum de la vitesse verticale enregistrée au-dessus de l'obstacle est une fonction croissante de l'angle de déviation, la quantité déviée étant d'autant plus importante que l'angle est faible. Les valeurs sont trois fois moindres que celle observées pour la digue d'arrêt. D'une façon générale, les réductions de vitesses verticales, tant positives que négatives, à l'aval de l'obstacle (Figure 59 et Figure 60) sont moindres dans le cas des digues déviatrices. Ceci est particulièrement vrai, 100 cm à l'aval des obstacles, au moment où se rejoignent les deux parties de l'écoulement.

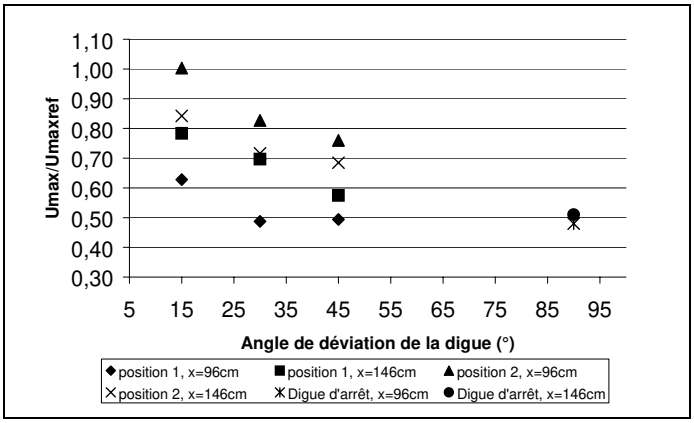

Figure 58. *Rapport entre les vitesses horizontales maximales près du sol (y=0.85cm) avec et sans digue déviatrice, en fonction de l'inclinaison de la digue, pour différentes positions et différentes abscisses*

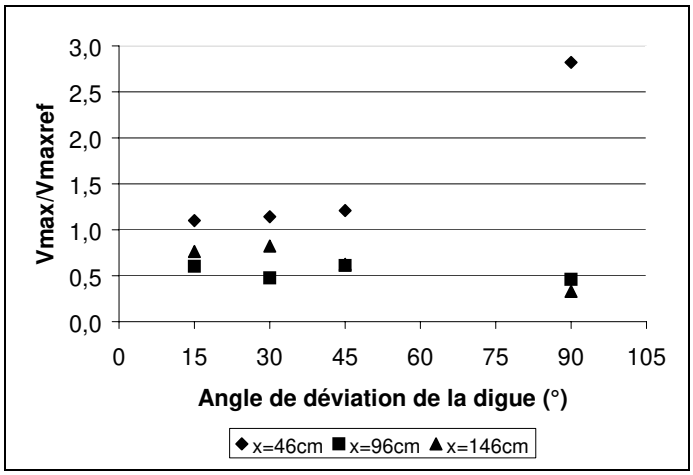

Figure 59. *Rapport entre les vitesses verticales positives maximales avec et sans digue déviatrice, en fonction de l'inclinaison de la digue*

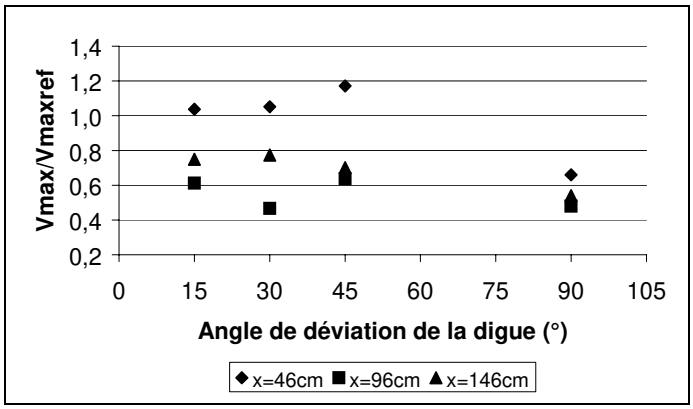

Figure 60. *Rapport entre les vitesses verticales négatives maximales avec et sans digue déviatrice, en fonction de l'inclinaison de la digue*

Les tas freineurs

Les différentes configurations de tas freineurs testées sont issues de l'étude effectuée par Hakonardottir [HAK 03] traitant de l'interaction entre tas freineurs et avalanches denses. Les différentes caractéristiques sont présentées dans le Tableau 6.

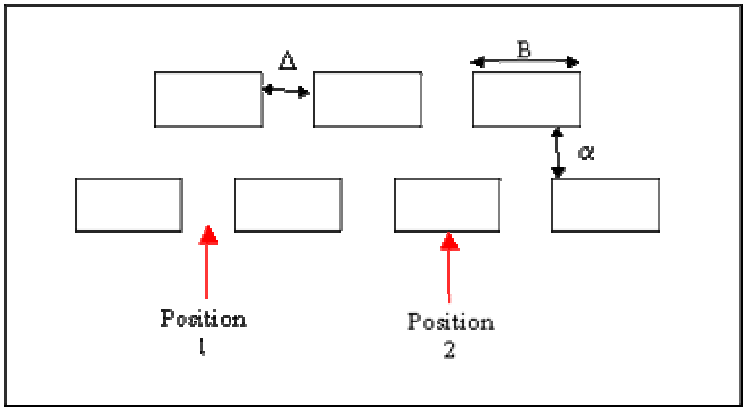

Figure 61. *Tas freineurs*

Dénomination	*Hauteur H (cm)*	*Largeur B (cm)*	*Distance entre tas Δ (cm)*	*Nombre d'éléments par ligne Nb*	*A=(NbxB)/ [NbxB+(Nb-1)xΔ]*	*H/B*
Tas freineurs C	6	12	7	3	0,72	0,5
2 rangées décalées de tas freineurs C (α=22,3 cm)	6	12	7	3 puis 4		0,5
Tas freineurs A	6	9	4.7	4	0,72	0,66
Tas freineurs B	6	6	3.6	6	0,67	1

Tableau 6. *Caractéristiques des tas freineurs*

Lorsque la bouffée de densité atteint la rangée de tas freineurs, une première partie de l'écoulement est canalisée entre les espaces laissés libres entre les tas avant de s'étaler le long du plan incliné et d'interagir avec les autres jets, alors que la seconde partie heurte l'obstacle, le franchit avant de retomber à l'aval (Figure 62).

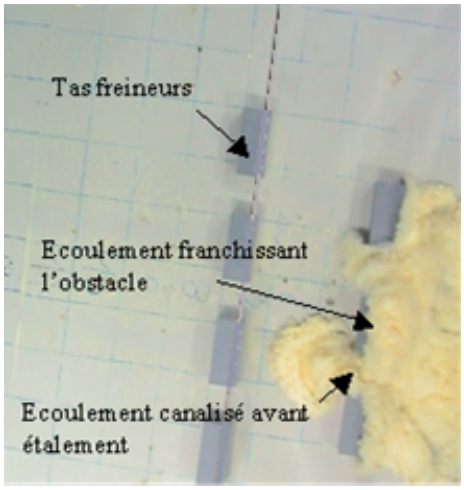

Figure 62. *Interaction entre une bouffée de densité et deux rangées de tas freineurs*

L'étude de la valeur adimensionnelle de la vitesse de front ne fait pas apparaître de différences notables de comportement entre les différents tas freineurs. La réduction de vitesse au maximum de 20% n'est finalement que très faible Il faut cependant noter que dans toutes les configurations la valeur du paramètre A, qui représente la proportion de la surface transversale obstruée par les obstacles (Tableau 6) est sensiblement identique (entre 0,67 et 0,72) et que pour être complète, l'étude devrait intégrer l'influence du paramètre A (une réduction de la valeur de A semble diminuer l'efficacité (Figure 63) ; cependant cette tendance est située dans la gamme d'erreur de mesures et demanderait donc à être confirmée.). Tout comme dans le cas des digues déviatrices, la vitesse de frottement augmente à partir de 120 cm.

La mise en place d'une seconde rangée de tas freineurs semble augmenter de façon importante l'efficacité du dispositif. Cependant, comme nous l'avions fait remarquer précédemment, la vitesse de front n'est pas le paramètre le plus approprié pour définir cette efficacité. L'étude du rapport Umax/Umaxref (Figure 64) permet de mieux différencier le fonctionnement des différents tas freineurs. Le ralentissement est d'autant plus marqué que la valeur H/B est faible (avec H et B hauteur et largeur du tas freineur (voir Tableau 6), si bien que la forme cubique (qui va de pair avec un nombre important d'espaces entre tas freineurs sachant que A est quasiment constant), n'est pas la plus appropriée. Or le résultat inverse a été trouvé pour les avalanches de neige dense modélisées par un écoulement granulaire [HAK 03]. La mise en place d'une seconde rangée de tas freineurs se traduit effectivement par une diminution du rapport Umax/Umaxref, qui reste cependant supérieur à celui obtenu pour les digues d'arrêt. La différence entre les vitesses observées en position 1 et en position 2 pour la même

abscisse (Figure 64) n'est guère prononcée et ceci est d'autant plus vrai que l'on s'éloigne de l'obstacle. Dans le cas des deux rangées, l'abscisse 96 cm est située 15,5 cm en aval de la deuxième rangée (contre 43,5 cm pour une seule rangée) et donc dans ce cas précis, les effets d'accélération entre l'espace laissé libre entre deux tas sont bien visibles. Les vitesses apparaissent plus redistribuées que réduites. Ainsi la Figure 65 montre 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. De même que précédemment, on observe une réduction des vitesses verticales, positives et négatives (Figure 66), qui est cependant moindre que celle observé pour les digues d'arrêt et les digues déviatrices. Il n'y a pas de différences significatives entre les positions 1 et 2.

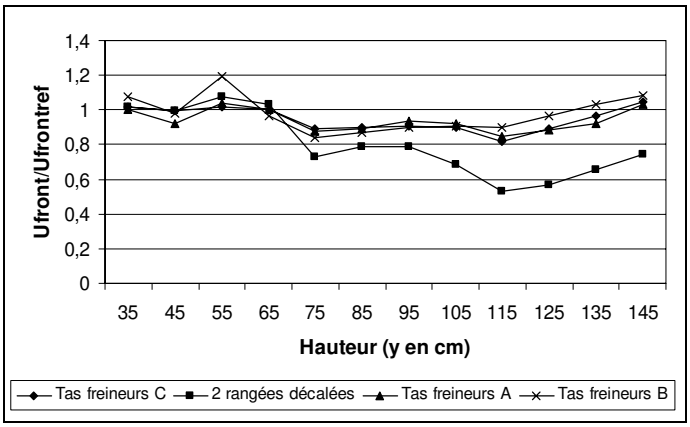

Figure 63. *Valeurs de Ufront/Ufrontref en fonction de la distance, pour différentes configurations de tas freineurs*

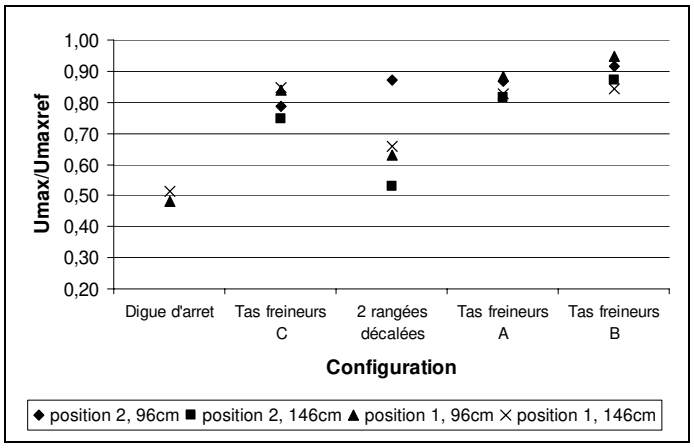

Figure 64. *Rapport entre les vitesses horizontales maximales près du sol (y=0.85cm) avec et sans tas freineur pour différentes configurations, positions et abscisses.*

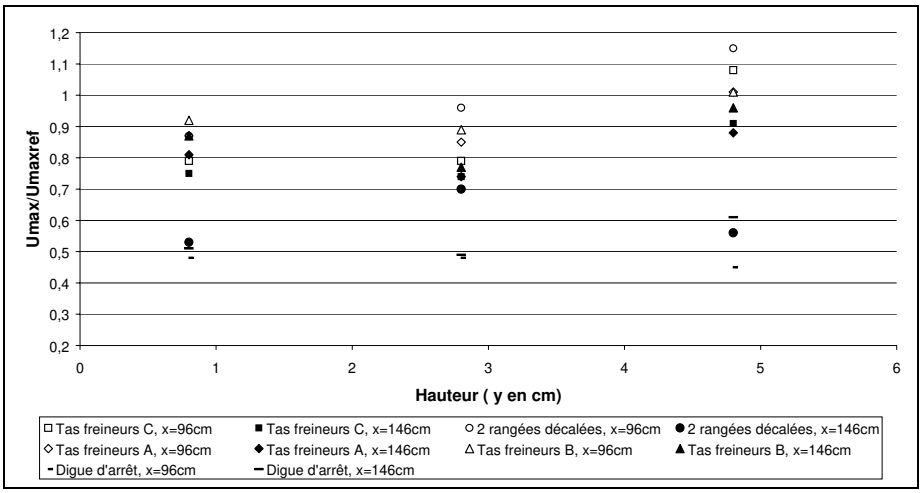

Figure 65. *Rapport entre les vitesses horizontales maximales avec et sans ouvrage en fonction de la hauteur, pour la position 2*

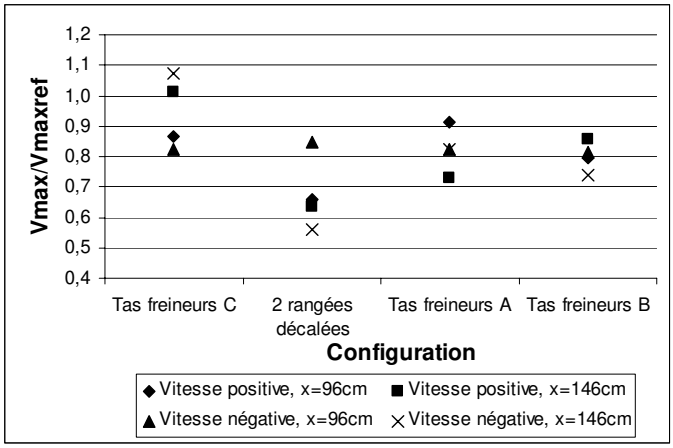

Figure 66. *Rapport entre les vitesses verticales maximales avec et sans tas freineur, en fonction de la configuration, pour les vitesses verticales positives et négatives, et pour différentes abscisses. Ici la position est la position 1.*

Synthèse et limite de l'étude par modélisation physique

Le rapport de densité le plus grand qui soit atteint dans les expérimentations en cuve est de 1.2. Or, il apparait que le rapport de densité influe sur les résultats obtenus. Sachant que le rapport de densité au sein des avalanches poudreuses réelles peut atteindre 10, l'extrapolation directe des résultats obtenus (en terme de vitesse et pression) par modélisation physique dans la cuve n'est pas envisageable, le rapport de densité ayant, dans le cas des franchissements d'obstacles, une influence plus marquée que celle à laquelle on pouvait s'attendre (section 4.2)**.** Dans le cas des digues d'arrêt, les résultats obtenus ont servis de base de données permettant de valider une approche numérique (section 4.2).

Pour les digues de déviation et les tas freineurs, cette approche n'a pas été finalisée dans le cadre du projet CADZIE et la modélisation physique permet simplement de comparer le fonctionnement relatif de différents ouvrages de protection afin d'optimiser leur conception dans le cas d'une hauteur adimensionnelle de 0,56 (H_{digue}/H_{ref} où H est la hauteur de l'obstacle et H_{ref} la hauteur de l'avalanche de référence). Ainsi, il apparaît que :

- l'efficacité d'une digue de déviation est une fonction croissante de l'angle de déviation.
- pour une même surface d'obstruction, il semble plus efficace de mettre en place de larges tas freineurs.

- les tas freineurs, même disposés sur deux rangées, dissipent moins d'énergie que les digues d'arrêt et de déviation.

4.2 Modélisation numérique

Les expériences réalisées dans la cuve pour un rapport de densité de 1.2 ont ainsi été simulées numériquement et ce, afin de valider l'approche numérique. Puis, les simulations numériques ont été réalisées pour des rapports de densité plus élevés de 2, 5 et 10. Le but ultime est de déterminer les coefficients de perte de charge locale et les coefficients d'incorporation locale du fluide ambiant. Ces coefficients seront explicités au paragraphe 4.2.3.

4.2.1 Equations régissant le modèle

Le principe de la modélisation numérique est le suivant : Deux équations de conservation de la masse, une pour la solution saline et une pour le mélange solution saline + 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. La densité moyenne du mélange $\bar{\rho}$ est obtenue à partir de la relation suivante :

$$\bar{\rho} = \rho_w \cdot (1 - \bar{c}) + \rho_s \bar{c} \qquad \textbf{11}$$

avec $\bar{c}$ la fraction volumique de la solution saline. Les densités de l'eau ρ_w (1000 kg/m³) et de la solution saline ρ_s (1200 kg/m³) sont supposées constantes. En considérant t pour le temps, u_i pour la composante de la vitesse dans la direction i et x_i les coordonnées spatiales dans la direction i, la conservation de la masse pour le mélange s'exprime de la façon suivante :

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \cdot \bar{u_i})}{\partial x_i} = -\frac{\overline{\rho' u_i'}}{\partial x_i} \approx 0 \qquad \textbf{12}$$

Les quantités moyennées sont surmontées d'une barre et les valeurs fluctuantes sont notées avec un '.
La conservation de la masse pour la solution saline seule est notée :

$$\frac{\partial (\rho_s \bar{c})}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_s \bar{c} \cdot \bar{u_i})}{\partial x_i} = -\frac{\partial (\rho_s \overline{c' u_i'})}{\partial x_i} \qquad \textbf{13}$$

Le terme de droite tient compte de la dispersion turbulente de la solution saline.
La conservation de la quantité de mouvement du mélange se traduit par l'équation suivante :

$$\frac{\partial (\bar{\rho} \cdot \bar{u_i})}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{\rho} \cdot \bar{u_i} \cdot \bar{u_j})}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\tau_{ij}} - \bar{\rho} \cdot \overline{u_i' u_j'}) + \bar{\rho} g_i \qquad \textbf{14}$$

La contrainte visqueuse $\bar{\tau}_{ij}$ est négligeable devant la contrainte turbulente $-\bar{\rho} \cdot \overline{u_i' u_j'}$. Afin de fermer le système d'équations, des équations supplémentaires sont requises. On utilise dans ce cas précis le modèle k-ε qui est un modèle de turbulence à deux équations de transport basé sur le concept de viscosité turbulente. Dans le cadre du projet européen CADZIE, les simulations ont été effectuées par AVL (Autriche) en utilisant le code de mécanique des fluides FIRE développé par la même société. On pourra y consulter plus précisément les résultats obtenus ainsi que les comparaisons avec les expérimentations réalisées dans la cuve du Cemagref dans le rapport final du projet CADZIE (http://www.grenoble.cemagref.fr/etna/resultats/projet_recherche_europeen/cadzie.htm).

4.2.2 Evaluation qualitative de la protection assurée par des obstacles de différentes hauteurs

Connaissant la densité et la vitesse de l'écoulement, la modélisation numérique permet d'avoir accès aux champs de pression (la pression dynamique est égale à $0.5\rho U^2$) ce que ne permettait pas les expériences en cuve la densité ne pouvant être mesurée.

Les images suivantes représentent le champ de pression dynamique simulé au sein d'une avalanche poudreuse et la modification de ce champ de pression par la présence d'un obstacle (mur plein de différentes hauteurs implantées sur un terrain d'inclinaison constante de 10 °). Pour représenter le caractère transitoire sur

une seule image, seule la pression maximale enregistrée dans le temps est représentée en chaque point de l'espace. Les champs de pression correspondent aux expériences réalisées dans la cuve du Cemagref de Grenoble. La simulation est bidimensionnelle puisque l'on considère l'obstacle (le mur) et l'avalanche infiniment large. Les figures permettent d'avoir une visualisation qualitative des régions protégées par des murs de différentes hauteurs. La Figure 67 montre le cas de référence, c'est-à-dire l'avalanche sans obstacle. Les figures suivantes correspondent aux hauteurs de mur de 2, 4, 6 and 8 cm (rappelons que la hauteur de l'avalanche de référence est de 13.5 cm). Tout d'abord, il est clair qu'un mur, autrement dit une digue frontale, n'a que très peu d'influence sur une avalanche poudreuse. Quelque soit le cas de figure, l'avalanche poudreuse franchit le mur et accélère de nouveau à l'aval si le terrain est suffisamment raide. Il est également visible que la pression immédiatement à l'aval de la digue est considérablement réduite. La digue de 2 cm protège une région correspondant à 5 fois la hauteur du mur mais seulement à proximité du sol. On observe encore des pressions considérables à des hauteurs plus élevées. La digue de 4 cm (Figure 69) protège une région plus longue et le mur de 6 cm (Figure 70) semble assurer la protection la plus efficace, même comparée à la digue de 8 cm (Figure 71). Il protège une importante zone à l'aval et la pression ne croit que de nouveau très loin à l'aval, où l'on imagine que le couloir d'avalanche n'est plus très raide. Le mur de 8 cm a localement moins d'effet (Figure 71); c'est seulement assez loin de la digue que son effet protecteur est plus important que celui engendré par la digue de 6 cm.

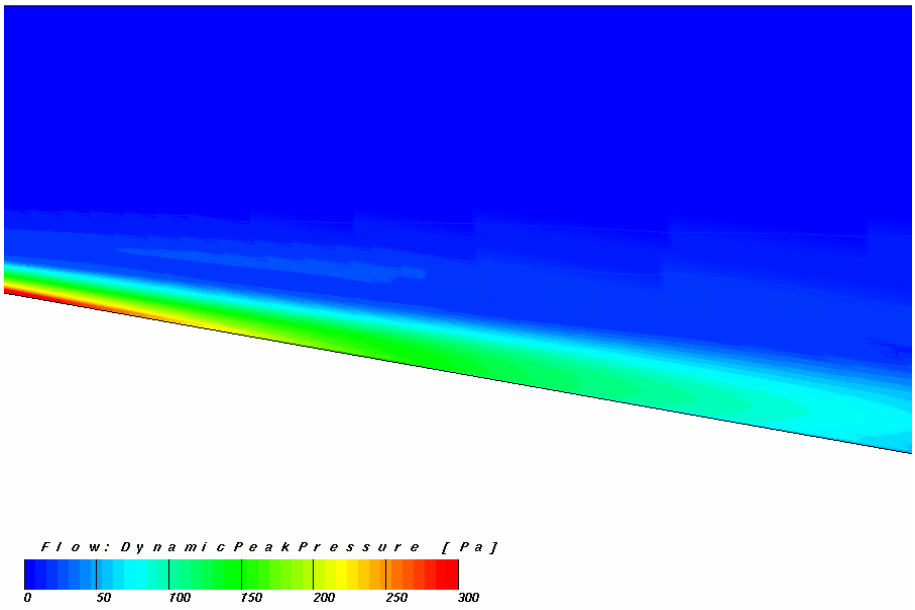

Figure 67. *Pic de pression dynamique, avalanche de référence*

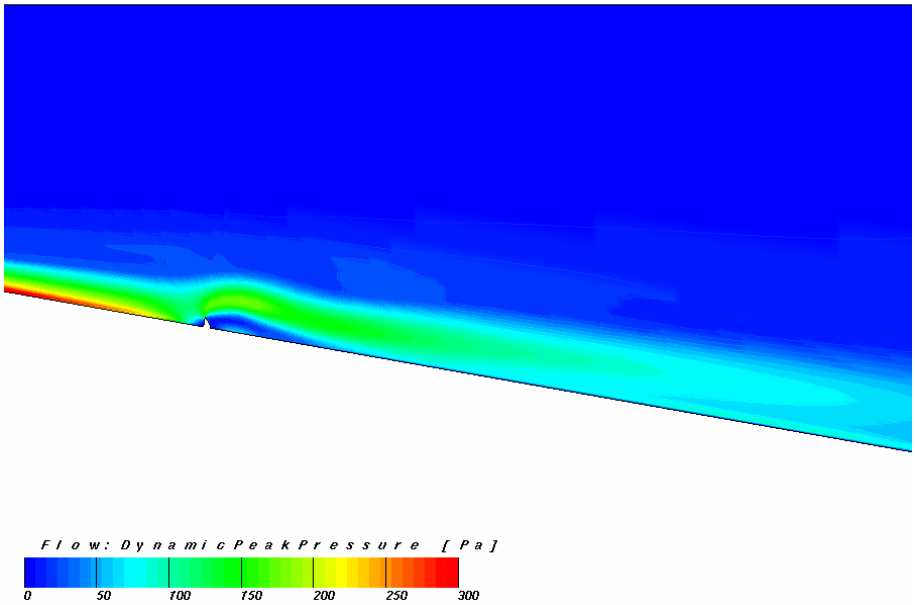

Figure 68. *Pic de pression dynamique, digue de 2 cm*

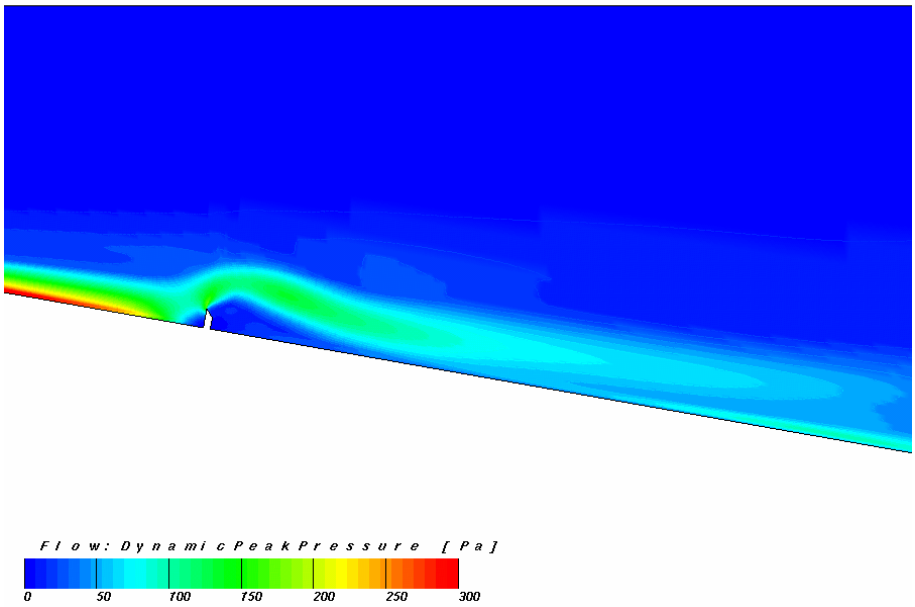

Figure 69. *Pic de pression dynamique, digue de 4 cm*

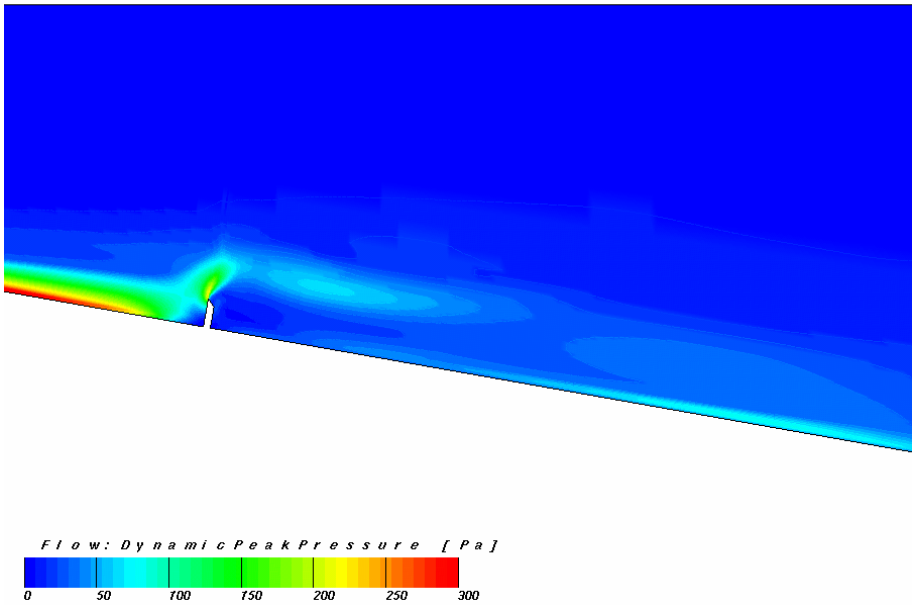

Figure 70. *Pic de pression dynamique, digue de 6 cm*

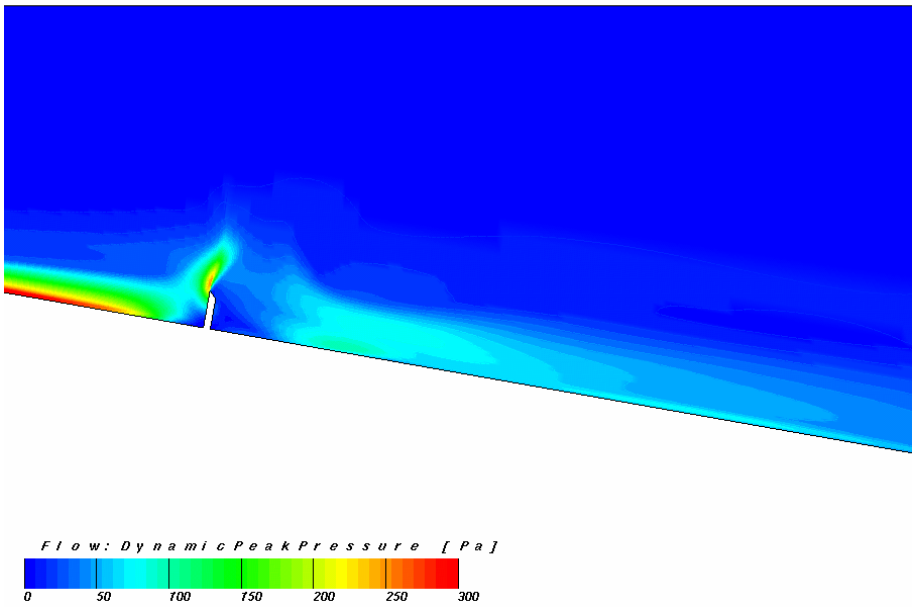

Figure 71. *Pic de pression dynamique, digue de 8 cm*

4.2.3 Définition des coefficients de perte de charge locale c_R et d'incorporation locale du fluide ambiant c_E

L'idée de base est d'implanter les coefficients de perte de charge locale et d'incorporation locale du fluide ambiant dans des modèles de type Saint-Venant en utilisant le modèle numérique de terrain sans la structure et en considérant une « boîte noire » à l'emplacement de la structure. On appelle modélisation de type « Saint-Venant », les modélisations au sein desquelles les valeurs des différents paramètres sont moyennées sur la hauteur. Le coefficient de perte de charge locale permet de calculer la force de résistance (force que la barrière

exerce sur le fluide). Le coefficient d'incorporation du fluide ambiant permet de déterminer la masse de fluide additionnelle incorporée et due à la présence de l'obstacle. On considère que les coefficients dépendent de la vitesse et la densité de l'avalanche. La boîte noire doit contenir la structure de défense mais doit également englober une distance à l'amont et à l'aval de cette dernière de telle sorte que les perturbations générées par la structure soient contenues dans cette boîte noire. La Figure 73 indique la structure de protection, la force de résistance (F_R) et l'air entrainé (flèches en pointillées). La distance couverte à l'amont (L_+ sur la figure) et à l'aval (L_-) correspondent à 5 fois la hauteur de la structure.

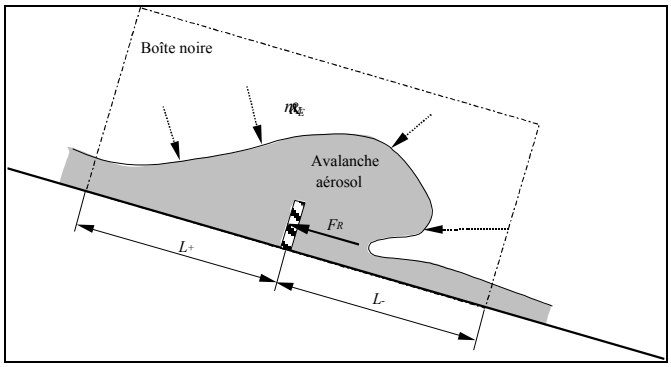

Figure 72. *Boîte noire, coupe longitudinale*

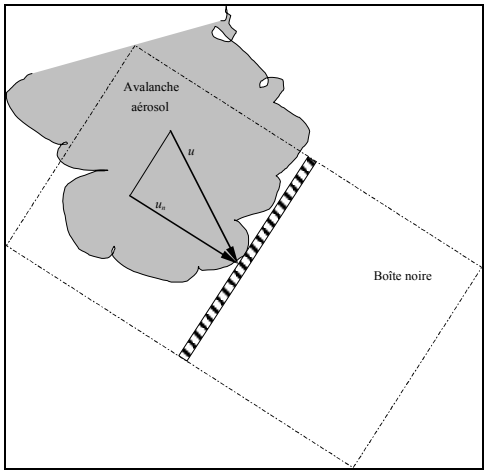

Figure 73. *Boîte noire, vue de dessus (u correspond à la vitesse de l'avalanche et u_n correspond à la vitesse de l'avalanche normale à la structure)*

La force de résistance (ou force que la barrière exerce sur le fluide) s'écrit :

$$F_R = c_R \rho \frac{u_n^2}{2} A_R \qquad \textbf{15}$$

avec C_R coefficient de perte de charge locale, ρ densité de l'avalanche à l'intérieur de la boîte noire, Ar surface de la structure projetée suivant la normale à la structure et la tangente au terrain.
La masse de fluide $\dot{m}_E$ incorporée par unité de temps est donnée par l'équation suivante :

$$\dot{m}_E = c_E u_n \rho A_{box} \qquad \textbf{16}$$

avec C_E coefficient d'incorporation locale du fluide ambiant et A_{box} surface de la boîte noire projetée sur le sol.
La boîte noire doit couvrir une certaine distance en amont (L_+ sur la Figure 72) et en aval (L- sur la Figure 72) que l'on propose égale à 5 fois la hauteur de la structure.
Dès lors, ces deux équations (15 et 16) peuvent être introduites dans les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement pour les modèles 1D ou 2D de type «Saint-Venant» d'avalanches poudreuses.

4.2.4 *Détermination des coefficients de perte de charge c_R et d'incorporation locale du fluide c_E à partir des simulations numériques*

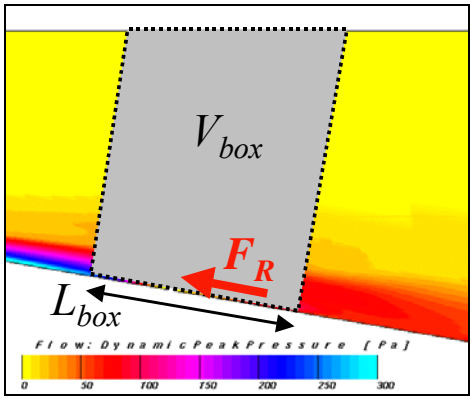

Figure 74. *Boîte noire utilisée au sein des modélisations de type « Saint-Venant »*

Les coefficients ont été déterminés par intégration des paramètres calculés lors des précédentes modélisations numériques dans le temps et dans l'espace (sur la surface de la « boîte noire »). Ainsi la force de résistance en intégrant la pression sur la surface de la digue peut s'écrire :

$$F_R = \int_{A_R} p dA_x \qquad \textbf{17}$$

Seule la composante suivant x (tangentielle au terrain et normale à l'obstacle) est prise en compte.

La densité moyenne au sein de la boîte noire est calculée de la façon suivante :

$$\overline{\rho} = \frac{\int_{V_{box}} \varepsilon \rho dV}{\int_{V_{box}} \varepsilon dV} \qquad \textbf{18}$$

ρ est la densité du mélange. ε est égal à 1 lorsque la densité du mélange est supérieure à celle du fluide ambiant. Dans le cas contraire, ε est égal à 0, si bien que l'intégration ne concerne effectivement que le volume concerné par l'avalanche. De façon identique, on détermine une vitesse moyenne suivant la direction x.

$$\overline{u} = \frac{\int_{V_{box}} \varepsilon u_x \rho dV}{\int_{V_{box}} \varepsilon \rho dV} \qquad \textbf{19}$$

On peut ainsi définir la quantité de mouvement suivant la direction x :

$$\overline{\rho u} = \frac{\int_{V_{box}} \varepsilon u_x \rho dV}{\int_{V_{box}} \varepsilon dV} \qquad \textbf{20}$$

Ces différentes valeurs moyennes sont aussi fonction du temps. La Figure 75 montre un exemple de l'évolution temporelle de la force de résistance F_R. Seul l'intervalle de temps durant lequel l'avalanche passe au niveau de la digue est important. Aussi la moyenne temporelle sera effectuée sur l'intervalle de temps durant lequel la masse de l'avalanche contenue à l'intérieur de la boîte noire est supérieure à la masse située en dehors de la boîte noire.

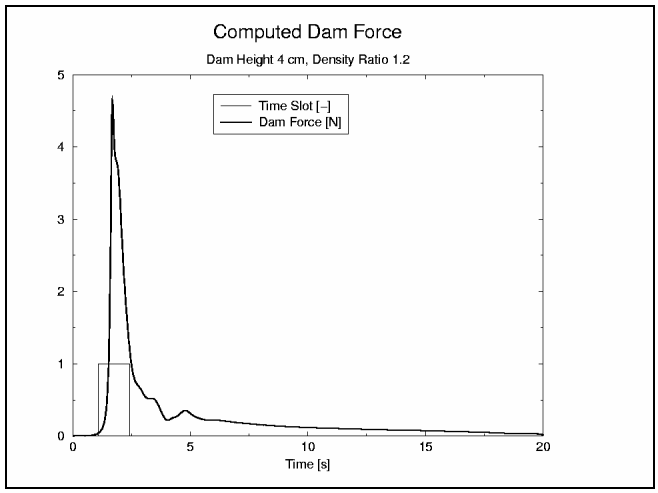

Figure 75. *Evolution temporelle de la force de résistance (trait épais). L'intervalle de temps sur lequel est effectuée la moyenne est indiqué en trait fin.*

L_{box} est la longueur de la boîte noire (suivant la direction x).

$$c_R = \frac{1}{t_2 - t_1} \frac{2}{A_R} \int_{t_1}^{t_2} \frac{F_R}{\bar{u} \cdot \bar{\rho u}} dt \qquad \textbf{21}$$

$$c_E = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{\dot{m}_E}{\bar{u}\bar{\rho} A_{box}} dt \qquad \textbf{22}$$

Dans la formulation précédente, $\dot{m}_E$ correspond au flux de masse de fluide incorporé, qui correspond à la différence entre la masse de l'avalanche sortant de la boîte noire et la masse de l'avalanche entrant dans la boîte noire. A_{box} correspond à la surface de la boîte noire (projection au niveau du sol).
Les valeurs obtenues par AVL au sein du projet CADZIE sont les suivantes :

$r_{\rho INI}\downarrow$ $h[cm] \rightarrow$	*2*	*4*	*6*	*8*
2	0.18	0.36	0.54	0.72
5	0.20	0.40	0.60	0.80
10	0.25	0.50	0.75	1.0

Tableau 7. *Table des hauteurs adimensionnelles $r_h = h_{wall}/h_{head}$*

h_{wall} est la hauteur de la digue et h_{head} est la hauteur de l'avalanche de référence.

$r_{\rho INI}\downarrow$ $h[cm]\rightarrow$	*2*	*4*	*6*	*8*
2	6.29	8.48	12.4	44.1
5	10.5	15.0	24.1	37.3
10	11.3	20.4	22.9	31.8

Tableau 8. *Table des coefficients de perte de charge c_R pour différentes hauteurs adimensionnelles et différents rapports de densité*

$r_{\rho INI} \downarrow$ $h[cm] \rightarrow$	2	4	6	8
2	0.23	0.28	0.36	0.79
5	0.18	0.26	0.40	0.53
10	0.11	0.22	0.30	0.35

Tableau 9. *Table des coefficients d'incorporation locale du fluide ambiant c_E pour différentes hauteurs adimensionnelles et différents rapports de densité*

On constate ainsi que les coefficients d'entraînement décroissent lorsque le rapport de densité augmente, étant donné que l'influence de l'air est moindre lorsque la densité de l'avalanche augmente. C'est ce comportement qui ne nous permet pas d'appliquer directement les résultats obtenues en cuve à l'avalanche réelle.

4.2.5 Exemples d'application

Les différentes étapes de calcul utilisant les différents coefficients sont les suivantes :

1. Déterminer la boîte noire (L+ et L-)
2. Déterminer la hauteur de la tête de l'avalanche lorsqu'elle atteint la boîte et calculer r_h en divisant la hauteur de la structure de protection par cette hauteur.
3. Déterminer le rapport de densité $r_{\rho INI}$ en divisant la densité du mélange initial (soit la densité maximale) par la densité de l'air.
4. Interpoler une hauteur h virtuelle (Tableau 7) à partir de r_h et $r_{\rho INI}$.
5. Interpoler c_R (Tableau 8) et c_E (Tableau 9) à partir de h et $r_{\rho INI}$.
6. Calculer F_R à partir de l'équation 15 et $\dot{m}_E$ à partir de l'équation 16.

Dans la modélisation de Saint-Venant, l'étape 6 doit être répétée à chaque pas de temps. Il faut ensuite appliquer la force de résistance F_R à l'équation de conservation de la quantité de mouvement et la masse de fluide entrainée $\dot{m}_E$ à l'équation de conservation de la masse du mélange (il y a addition d'air à l'avalanche poudreuse mais il n'y a pas addition de neige).

Exemple 1: Intégration de l'effet d'un obstacle dans un modèle 1D de type Saint-Venant

La Figure 76 montre le cas de figure correspondent à un modèle 1D (suivant une direction, puisque les paramètres sont moyennés sur la hauteur) de type Saint-Venant. Dans ce cas, l'avalanche est discrétisée dans l'espace suivant une direction longitudinale et pour chaque cellule la vitesse, la masse du mélange et la masse de neige sont calculées.

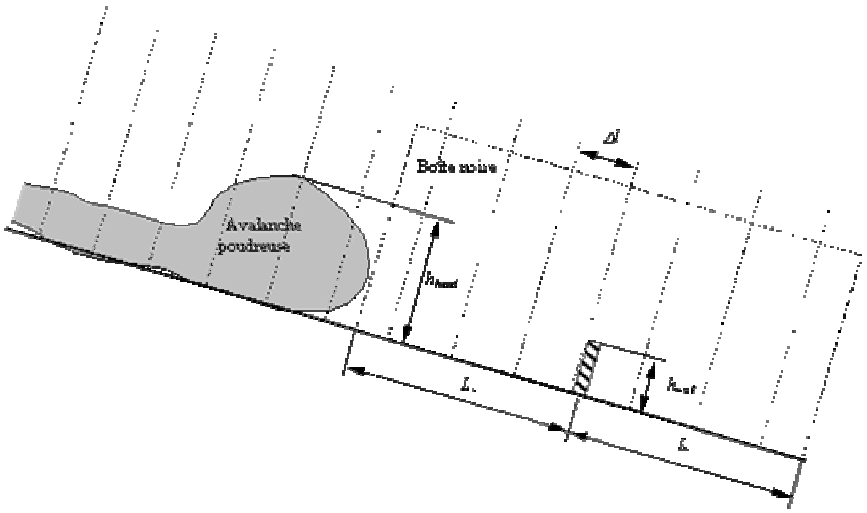

Figure 76. *Application à une modèle de type Saint-Venant 1D*

Considérons une hauteur de structure de protection de 10 m. La boîte noire doit donc s'étendre de 5 x 10 = 50 m de chaque coté de la structure (L_+ et L_- font 50 m). Faisons maintenant l'hypothèse que l'on fait fonctionner le modèle de Saint Venant jusqu'au pas de temps où l'avalanche entre dans la boîte noire et qu'à cette position la hauteur de la tête de l'avalanche h_{head} est de 20 m. Le rapport de hauteur r_h est alors de h_{wall}/h_{head} = 10 / 20 = 0.5. Faisons maintenant l'hypothèse que la densité maximale de l'avalanche poudreuse dans notre modèle est de 10 kg/m^3 et que la densité de l'air est de 1.3 kg/m^3. A partir de là, il est possible de calculer le rapport de densité $r_{\rho INI}$ à 10 / 1.3 = 7.7. A partir de $r_{\rho INI}$ et r_h et en utilisant le Tableau 7, on obtient une valeur d'environ 4.5 pour h ($r_{\rho INI}$ = 5 conduit à h = 5 pour r_h = 0.5 et $r_{\rho INI}$ = 10 conduit à h = 4). Avec h = 4.5 et $r_{\rho INI}$ = 7.7, on obtient alors une valeur de 10 pour c_R (Tableau 8) et une valeur de 0.3 pour c_E (Tableau 9).

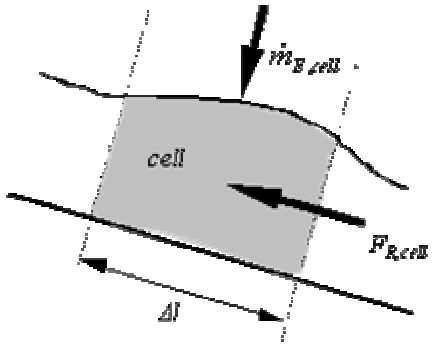

Figure 77. *Force de résistance et masse de fluide incorporée au niveau d'une cellule*

Considérons maintenant le pas de temps suivant où l'avalanche est cette fois ci entrée à l'intérieur de la boîte noire : quelques cellules (considérons par exemple une cellule de longueur Δl = 5m) du modèle sont donc remplies par l'avalanche (Figure 77). Considérons une vitesse et une densité de l'avalanche de 40 m/s et une 2kg/m^3 respectivement, à partir de l'équation 15, on obtient la force de résistance F_R suivante :

$$F_R = c_R \rho \frac{u_n^{\ 2}}{2} A_R = 10 \cdot 2 kgm^{-3} \cdot \frac{(40 ms^{-1})^2}{2} 0.5 m^2 = 8000 N = 8 kN$$

en considérant les calculs effectués par mètre linéaire (la profondeur de la cellule, w, est de 1 m). Pour la boîte noire considérée, Ar est la surface de la structure projetée suivant la normale à la structure et la tangente au terrain. Noter ici que l'on considère seulement une partie de A_R proportionnelle à la surface de la cellule : A_R = 10 x 1 x (5/100) = 0.5m^2. La surface A_R déterminée pour la boîte noire est multipliée par $\Delta l / L_{box}$ = 5 / 100 ! (la longueur de la boîte noire est donnée par $L_{box} = L_+ + L_-$)
A l'aide de l'équation 16 et de la surface de la cellule projetée sur le sol (!), $A_{box} = \Delta l\ w$ = 5 x 1 = 5m^2 , on obtient le flux de masse de fluide entraînée $\dot{m}_E$ dans la cellule.

$$\dot{m}_E = c_E u_n \rho A_{box} = 0.3 \cdot 40 ms^{-1} 1.3 kgm^{-3} 5 m^2 = 78 kgs^{-1}$$

En utilisant F_R et $\dot{m}_E$ et les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement, on passe au pas de temps suivant.

$$\rho V \frac{du}{dt} = \ldots - F_R$$

$$\frac{dm}{dt} = \ldots + \dot{m}_E$$

F_R et $\dot{m}_E$ ne doivent être utilises que lorsque les cellules du modèle appartiennent à la boîte noire précédemment définies.

Exemple 2: Intégration de l'effet d'un obstacle dans un modèle 2D de type Saint-Venant

La procédure à mettre en œuvre pour les modèles de type Saint-Venant bidimensionnels est sensiblement identique. La différence principale réside dans le fait que seule composante de la vitesse normale à l'obstacle u_n doit être utilisée dans les équations 12 et 13 (Figure 73). De même que précédemment, il faut veiller à ce que les surfaces A_R et A_{box} correspondent effectivement aux surfaces considérées pour la cellule (A_{cell} doit être remplacée par A_{box} et A_R doit être multiplié par A_{cell}/A_{box}) La force de résistance F_R peux effectivement conduire à une déflection latérale comme ceci peut être observé en réalité (Figure 78).

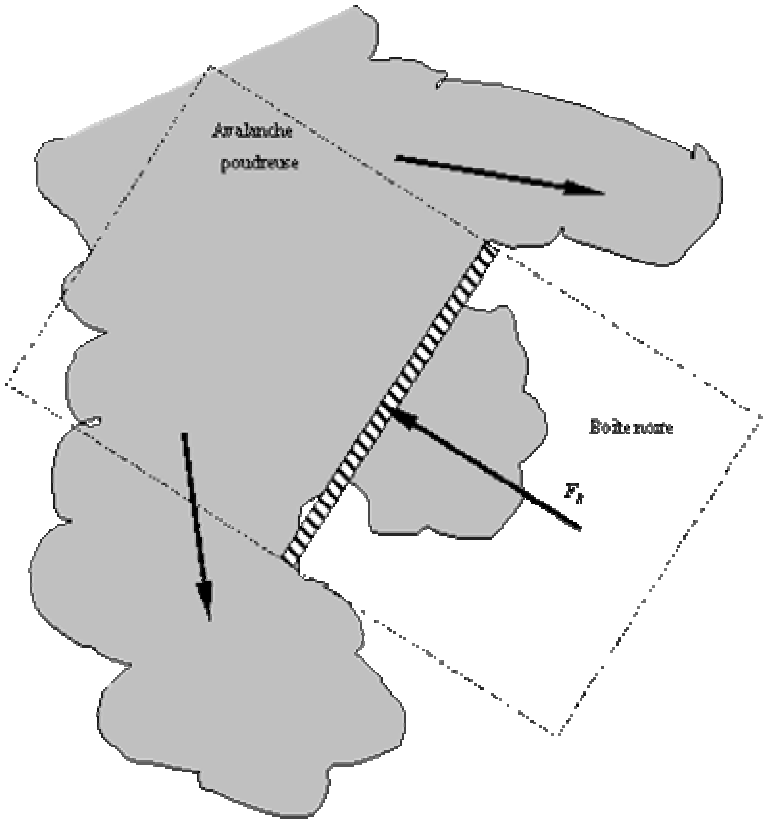

Figure 78. *Déflection latérale d'une avalanche poudreuse due à un obstacle*

5 References

[ANN 84] ANNO Y., "Requirements for modeling a snowdrift", *Cold Regions Science and Technology*, 8, 1984, pp. 241-252

[ANN 84] ANNO Y., "Froude number paradoxes in the modeling of a snowdrift", *Cold Regions Science and Technology*, 10, 1984, pp. 191-192.

[ANN 84] ANNO Y., "Applications of Anno's modeling conditions to outdoor modeling of snowdrifts", *Cold Regions Science and Technology*, 9, pp. 179-181.

[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.

[FAU 2002] FAUG, T., P. LACHAMP, M. NAAIM. 2002. Experimental investigation on steady granular flows interacting with an obstacle down an inclined channel: study of the dead zone upstream from the obstacle. *Natural Hazards and Earth System Sciences, 2, p. 187-191.*

[FAU 2003a] FAUG, T., M. NAAIM, D. BERTRAND, P. LACHAMP AND F. NAAIM-BOUVET. 2003. Varying dam height to shorten the run-out of dense avalanche flows: developing a scaling law from laboratory experiments. *Surveys in Geophysics, in press*.

[FAU 2003b] FAUG, T., M. NAAIM AND F. NAAIM-BOUVET. Experimental and numerical study of granular flow and fence interaction. *Submitted to Annals of Glaciology.*

[HAG 95] HAGER W.H. 1995. Energy dissipators. *Balkema Publishers.*

[HAK 2000] HAKONARDOTTIR K.M. 2000. Retarding effects of breaking mounds – Avalanches – *September 2000, a dissertation submitted to the University of Bristol in accordance with the requirements of the degree of master of Science in the Faculty of Science, 60 p.*

[HAK 2001] HÁKONARDÓTTIR, K.M., JOHANNESSON,T., TIEFENBACHER, F., AND KERN, M. 2001. A laboratory study of the retarding effect of breaking mounds in 3, 6 and 9m long chutes. *Technical report, VEDURSTOFA ÍSLANDS, Report No. 01007.*

[HAK 2003a] HÁKONARDÓTTIR, K.M., JOHANNESSON,T., TIEFENBACHER, F., AND KERN, M. 2003. Avalanche braking mound experiments with snow Switzerland – march 2002. Reykjavík, Veðurstofa, Íslands, Report No. 03???.

[HAK 2003b] HÁKONARDÓTTIR, K.M., HOGG, A.J., JOHANNESSON, T. AND TÓMASSON, G.G.T. A laboratory study of the retarding effect of braking mounds. *Journal of Glaciology in press.*

[HAK 2003c] HÁKONARDÓTTIR, K.M., HOGG, A.J., BATEY, J. AND WOODS, A.W. Flying avalanches. *Manuscript to be submitted to the Journal of Fluid Mechanics.*

[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.

[IRG 98] IRGENS, F., B. SCHIELDROP, C. B. HARBITZ, U. DOMAAS AND R. OPDAHL. 1998. Simulations of dense-snow avalanches on deflecting dams. *Annals of Glaciology*, **26**, 265-271.

[IVE 79] IVERSEN J.D, "Drifting snow similitude - Drift deposit rate correlation", Unpublished (paper presented at Fifth International Conference on Wind Engineering, Colorado, Fort Collins)

[IVE 80] IVERSEN J.D, "Drifting snow similitude - Transport rate and roughness modeling", *Journal of Glaciology*, Vol.26, No.94, 1980, pp 393-403.

[IVE 81] IVERSEN J.D, "Comparison of wind-tunnel model and full-scale snow fence drift", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 8, 1981, pp 231-249.

[IVE 82] IVERSEN J.D, "Small-scale modeling of drifting snow phenomena", *Wind tunnel Modeling for Civil Engineering Applications,* Cambridge UNIVERSITY Press, 1982, pp 522-545.

[JAE 2003] JAEDICKE C., NAAIM-BOUVET F., GRANIG M., Snow drift around avalanche defense structures, submitted to *Annals of Glaciology (presented at IGS Symposium Davos, Switzerland, 2-6 June 2003)*

[LIE 2002] LIED, K., A. MOE, K. KRISTERSEN AND D. ISSLER. 2002. Snow avalanche research programme SIP-6. Ryggfonn. Full scale avalanche test site and the effect of the catching dam. *Oslo, Norwegian Geotechnical Institute, NGI Report no. 581200-35.*

[MCL 93] MCCLUNG, D. AND P. SCHAERER. 1993. The Avalanche Handbook. *Seattle, The mountaineers.*

[NAA 95] NAAIM-BOUVET F., "Comparison of requirements for modeling snowdrift", *Surveys in geophysics,* vol. 16, 1995, 711-727.

[NAA 2002] NAAIM-BOUVET F., NAAIM M., BACHER M., HEILIGENSTEIN L. Physical modelling of the interaction between powder avalanches and defense structures, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, n°2, 2002, p. 193-202.

[NAA 2003a] NAAIM, M., T. FAUG AND F. NAAIM-BOUVET. 2003. Gravitational granular flow modeling: erosion and deposition processes around obstacles and singularities, *Surveys in Geophysics, in press*.

[NAA 2003b] NAAIM-BOUVET F., PAIN S., NAAIM M., FAUG T., Numerical and physical modelling of interaction between powder avalanches and dams : comparison with previous approaches, *Surveys in Geophysics,* 2003 (accepted).

[NAA 2003c] NAAIM-BOUVET F., NAAIM M., FAUG T. Dense and powder avalanches around obstacles / Dissipation processes : differences and similarities, submitted to *Annals of Glaciology (presented at IGS Symposium Davos, Switzerland, 2-6 June 2003)*

[NOR 94] NOREM, H. 1994. Snow Engineering for Roads. *Oslo, Norwegian Public Administration.*

[NOV 89] NOVAK, P., A.I.B. MOFFAT, C. NALLURI AND R. NARAYANAN. 1989. Hydraulic structures. *Unwin Hyman.*

[PET 84] PETERKA, A.J. 1984. Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators. *Engineering Monograph, No. 25. Denver, US Department of Interior, US Bureau of Reclamation.*

[PRI 2003] PRIMUS M., NAAIM-BOUVET F., NAAIM M. Physical modelling of the interaction between mounds or deflecting dams and powder snow avalanches submitted to *Cold Region Science and Technology.*

[SAL 87] SALM, B. 1987. Schnee, Lawinen und Lawinenschutz. *Vorlesungsskript, p. 273. ETH, Zürich.*

[SAM 2003] SAMPL P., NAAIM-BOUVET F., NAAIM M., Interaction between dams and powder avalanches : determination of simple friction laws for shallow water avalanche models, submitted to *Cold Region Science and Technology (presented at EGS-AGU-EUG Joint Assembly Nice, France, 06 - 11 April 2003)*

[USBR 87] U.S. BUREAU OF RECLAMATION. 1987. Design of small dams. *3rd edn. Washington, DC, US Department of interior.*

[VOE 55] VOELLMY, A. 1955. Über die Zerstörungskraft von Lawinen. *Schweizeriche Bauzeitung, 73 (12,15,17,19 and 37).*

[YIH 79] YIH, CHIA-SHUN. 1979. *Fluid Mechanics.* West River Press.