

La modélisation au service de la conception des ouvrages de protection : étude du site avalancheux de Taconnaz

Optimiser la conception des ouvrages de protection contre les avalanches est une priorité pour la sécurité en montagne. À partir d'une étude réalisée dans le cadre des travaux de renforcement de l'ouvrage paravalanche du glacier de Taconnaz, construit voilà vingt ans et montrant aujourd'hui ses limites, les auteurs nous démontrent ici comment une méthode combinant données historiques, statistique et modélisation peut être utilisée pour améliorer un dispositif paravalanche.



En février 1999, une avalanche* a débordé le système de défense construit en 1991 sur le couloir d'avalanche de Taconnaz (Haute-Savoie), montrant les limites des ouvrages mis en place en 1991, en particulier contre les avalanches rapides de neige sèche (photo ①). Les communes locales ont décidé de procéder à l'amélioration du dispositif paravalanche. Pour le dimensionnement du système de défense, les deux types d'écoulement – dense et poudreux (encadré ①) – doivent

être considérés. Le dispositif doit retenir les avalanches denses jusqu'à l'événement centennal, et il doit réduire la pression développée par l'écoulement en aérosol. À ces fins, le Cemagref a été chargé par le SIVOM* (syndicat intercommunal à vocations multiples) de la Haute Vallée de l'Arve :

- de prédéterminer l'aléa dû aux avalanches de neige denses en entrée du système de protection, pour dimensionner la meilleure combinaison d'ouvrages de protection capables d'étaler, dissiper l'énergie et retenir l'avalanche dense de référence ;
- d'analyser le risque résiduel dû à la partie poudreuse de l'écoulement.

Après une présentation du site d'avalanche de Taconnaz, l'article s'attachera à analyser la morphologie du couloir d'avalanche (encadré ②) et les zones de départ à partir des données historiques relatives à la météorologie et aux avalanches. Le modèle numérique utilisé permettra de déterminer les descripteurs de l'écoulement à l'entrée de la zone d'arrêt du couloir d'avalanches. À partir d'une analyse statistique, on prédéterminera le volume de l'avalanche et son nombre de Froude associé afin de construire une modélisation en laboratoire pour optimiser la forme, les dimensions, l'emplacement et le nombre de structures dissipatives d'énergie nécessaire à l'amélioration des ouvrages de protection du site.

① LES DIFFÉRENTS TYPES D'AVALANCHES

Dans les zones alpines, on observe deux classes d'avalanches. L'avalanche dense, dite parfois coulante, descend les pentes à la manière d'une coulée de boue. La masse volumique de la neige mobilisée est supérieure ou égale à celle de la neige en place. L'avalanche se comporte comme un bulldozer et charrie des masses de neige dense pouvant atteindre plusieurs centaines de milliers mètres cube. À mesure qu'elle progresse, l'avalanche accélère, grossit et s'élargit. Elle emporte tout sur son passage. Ce type d'avalanche suit le relief. Une diminution de la pente en deçà de 15 degrés déclenche le processus d'arrêt et la formation de gros dépôt. Les avalanches en aérosols d'aspect moutonneux, formées de gros tourbillons, sont des nuages de particules de glace en suspension dans l'air. L'épaisseur de ce type d'écoulement peut atteindre plusieurs dizaines de mètres et sa vitesse plusieurs dizaines de mètres par seconde. Ce type d'avalanche se produit par temps froid et mobilise de la neige sèche et sans cohésion. Les avalanches en aérosols sont peu sensibles aux variations de la topographie et de ce fait peuvent avoir des trajectoires imprévisibles. Le dépôt des avalanches en aérosols s'étale sur une grande surface. Il a une faible épaisseur et il est de ce fait peu perceptible. Les avalanches en aérosol pur (sans partie dense à la base) sont rares dans nos latitudes. Les avalanches mixtes (formé d'une base dense recouverte par un aérosol) sont plus fréquentes.

Les données nécessaires à la modélisation des scénarii de référence

Définir la valeur centennale des cumuls de précipitation sur trois jours

L'analyse des données météorologiques quotidiennes existantes enregistrées à Chamonix (altitude : 1 042 m), à Vallorcine (1 300 m) et aux Houches (1 008 m) nous per-



1 Photographie du dépôt de l'avalanche de février 1999 à Taconnaz, montrant les débordements latéral et frontal.

1 Précipitation centennale (m) sur trois jours, la durée des enregistrements à Vallorcine, Chamonix et Les Houches est respectivement de 40, 77 et 32 années

Site	Précipitation	Borne inférieure à 70 %	Borne supérieure à 70 %
Vallorcine	2,28	1,84	2,71
Chamonix	2,04	1,51	2,58
Les Houches	1,06	0,89	1,23

Source : Météo-France.

met de prédéterminer la précipitation centennale (cumul sur trois jours) à chaque endroit. Si nous considérons une masse volumique de neige autour de 130 kilogrammes par mètre cube, les hauteurs de neige correspondant à la précipitation centennale sont reportées dans le tableau 1. À l'échelle du massif du Mont-Blanc, le gradient vertical de précipitation cumulée annuelle moyenne est 3,81 millimètres par mètre pour une précipitation cumulée annuelle moyenne de 8,85 m. Si nous appliquons ce gradient aux données des Houches, la valeur centennale des cumuls de précipitation sur trois jours est comprise entre 1,6 m et 2,3 m, avec une valeur moyenne de 2 m à 3 300 m.

Recueillir les données historiques utiles

Parmi les données quantitatives collectées par l'EPA* (enquête permanente sur les avalanches), les altitudes

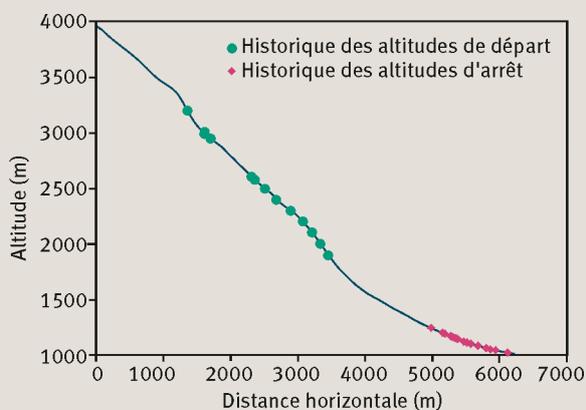
2 MORPHOLOGIE DU COULOIR D'AVALANCHE DE TACONNAZ

Le couloir d'avalanche de Taconnaz est situé dans la Haute Vallée de l'Arve, à proximité du Mont-Blanc (France). Tout au long du siècle dernier, plusieurs avalanches denses et mixtes, de grande ampleur, sont survenues dans ce couloir et ont atteint les zones habitées à plusieurs reprises. La surface de la zone de départ, la longueur et le dénivelé de ce couloir sont hors norme (photo 2). L'immensité de la zone de départ est la première caractéristique de ce couloir. Trois zones de départ majeures ont été identifiées. Entre les altitudes 3 300 m et 4 000 m, une vaste zone glaciaire, de surface égale à 200 ha, de morphologie fortement irrégulière, de pente moyenne 30°, orientée (nord-ouest/nord-est) sous les vents dominants, représente une zone d'accumulation privilégiée. Ses limites supérieures et inférieures sont constituées de longues lignes de séracs, avec une rupture de pente significative représentant une ligne de déclenchement préférentielle. Le volume de départ potentiel de cette zone de départ seule dépasse 4,0 106 m³. Une seconde zone de départ est située en aval, entre 2 800 m et 3 300 m, avec une surface de 80 ha. Ces deux premières zones alimentent une zone d'écoulement de 400 m de largeur et de 1 800 m de longueur, avec une pente moyenne de 31°. Dans cette zone, un volume additionnel de neige significatif peut être érodé par l'avalanche. En aval, sur le côté droit, une zone de départ latérale de pente 25°, de longueur 800 m et de largeur 300 m, est localisée entre 2 000 m et 2 600 m. Au-dessous de l'altitude de 2 150 m, le couloir est prolongé par une longue zone d'écoulement de pente 30°, de largeur 300 m et de longueur 900 m. À l'altitude de 1 700 m, l'avalanche rencontre une moraine. Les avalanches très rapides sont susceptibles de la déborder, mais la plupart des avalanches sont déviées vers la rive gauche. Après la moraine, l'avalanche entre dans sa zone d'arrêt de pente 13°. Comme cela est montré par l'ensemble des événements recueillis, la différence entre les distances d'arrêt* maximale et minimale est supérieure à 1 000 m. Le couloir d'avalanche de Taconnaz a une longueur de 7 km, une pente moyenne de 25°, et une largeur moyenne comprise entre 300 et 400 m.

2 Morphologie du bassin versant où les zones de départ principales ont été reportées (source : www.geoportail.fr pour le fond topographique).

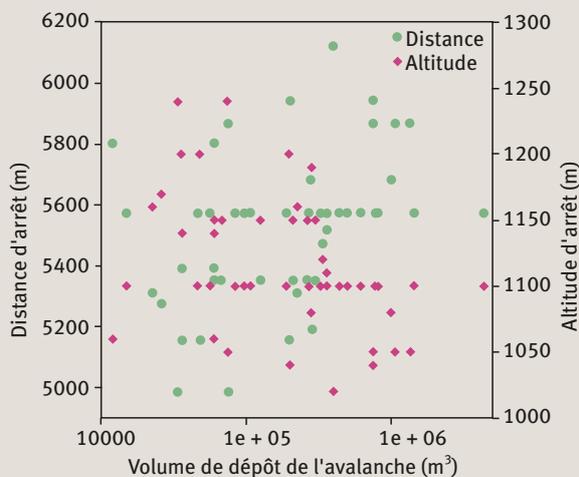


❶ Profil topographique du couloir de Tacconnaz et données historiques relatives aux altitudes de départ et d'arrêt



Source : EPA.

❷ Distances et altitudes d'arrêt historiques en fonction du volume de dépôt



Source : EPA, compléments RTM & Cemagref.

de départ et d'arrêt sont systématiquement relevées (figure ❶ pour les données de Tacconnaz) de même que la plupart des dimensions du dépôt (longueur, largeur et épaisseur moyennes). Nous avons utilisé ces trois dimensions pour estimer le volume du dépôt lié à chaque événement documenté (figure ❷). Pour le couloir de Tacconnaz, quelques volumes ont également été enregistrés directement par le RTM* (restauration des terrains en montagne) et le Cemagref.

Élaborer une rétro-analyse des avalanches denses à l'aide d'un modèle numérique 2D

On considère, dans cette partie, les avalanches de neige denses, incluant les parties denses des avalanches de neige mixtes. Toutes les données historiques ont été rétro-analysées à l'aide d'un modèle numérique de propagation des avalanches. Le modèle est basé sur les hypothèses suivantes (cf. Naaim *et al.*, 2004 pour plus de détails) :

- la neige est considérée comme un fluide quasiment incompressible ;
- l'avalanche est considérée comme un écoulement de couche mince contrôlé par une couche basale fine constituée de particules de neige et fortement cisailée alors que la partie supérieure constituant le corps est faite de grains et d'agrégats de grande taille (ce qui induit un taux de cisaillement beaucoup plus faible) ;
- la distribution de contrainte est considérée comme quasi-isotropique* ;
- le frottement effectif à la base de l'écoulement est régi par un modèle de Voellmy (Voellmy, 1955).

Les équations sont résolues à l'aide d'un schéma bidimensionnel en volumes finis basé sur un solveur de Riemann

(Naaim *et al.*, 2004). Le modèle prend en compte la topographie du terrain *via* les pentes et courbures locales sur une grille raffinée (5 m). La répartition spatiale initiale de la neige est introduite *via* une grille en deux dimensions. Afin de rétro-analyser chaque avalanche, nous détaillons maintenant comment nous avons défini les conditions initiales. La zone de départ est définie en fonction du point d'altitude de départ. Concernant le volume initial, l'hypothèse qui prévaut est l'égalité entre l'érosion et le dépôt tout au long du couloir et le volume initial est égal au volume du dépôt. Comme le couloir est ouvert et la partie principale d'écoulement couverte par le glacier de Tacconnaz, on fixe la valeur de ζ à 1 500 m s⁻².

Le calcul numérique est ainsi répété, en faisant varier le coefficient de frottement μ_0 jusqu'à ce que la valeur de l'altitude d'arrêt soit égale à celle observée.

Les valeurs obtenues pour le coefficient de frottement sont μ_0 reportées sur la figure ❸a en fonction de

❸ ÉQUATIONS INTÉGRÉES DANS L'ÉPAISSEUR

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = \varphi \quad \text{1a}$$

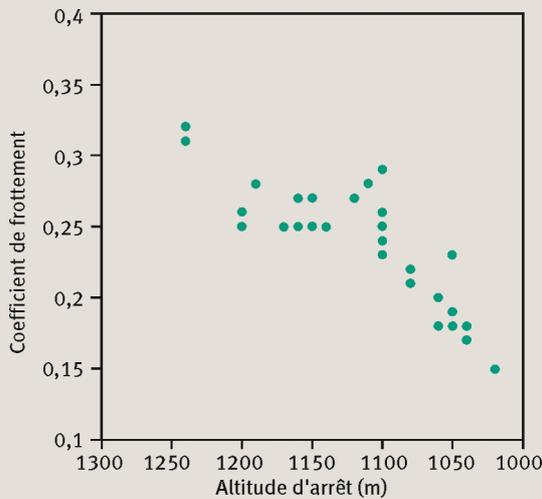
$$\frac{\partial}{\partial t}(hu) + \frac{\partial}{\partial x}(hu^2) + \frac{\partial}{\partial y}(huv) + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x}(g \cos \alpha h^2) = gh \cos \alpha \left[\frac{\partial z_s}{\partial x} - \mu \left(1 + C_x u \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{g} \right) \right] \quad \text{1a}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hv) + \frac{\partial}{\partial x}(huv) + \frac{\partial}{\partial y}(hv^2) + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial y}(g \cos \alpha h^2) = gh \cos \alpha \left[\frac{\partial z_s}{\partial y} - \mu \left(1 + C_y v \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{g} \right) \right] \quad \text{1c}$$

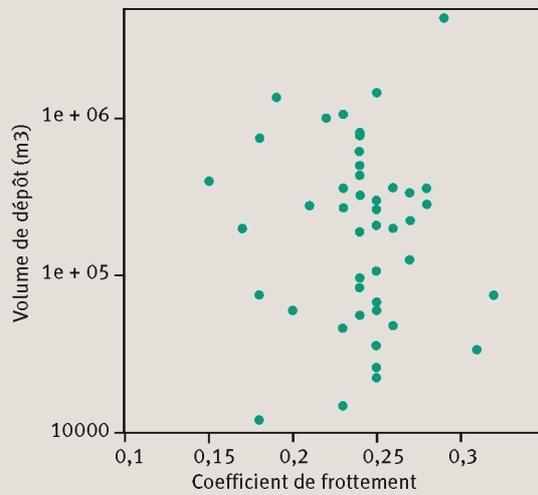
$$\text{avec } \mu = \mu_0 + \frac{u^2 + v^2}{\zeta h} \quad \text{2}$$

où h est la hauteur de l'écoulement, u et v sont les composantes du vecteur vitesse dans les directions x (est-ouest) respectivement y (sud-nord), z_s est l'altitude du terrain, α est l'angle de pente, C_x et C_y sont les courbures locales du terrain, μ_0 et ζ sont les coefficients de frottement, et φ est le flux de dépôt ou d'érosion comme défini dans (Naaim *et al.*, 2003).

3 Rétro-analyse des données historiques à l'aide de la modélisation numérique (source : Cemagref)



3a Coefficient de frottement μ_0 en fonction de l'altitude d'arrêt



3b Volume en fonction du coefficient de frottement μ_0

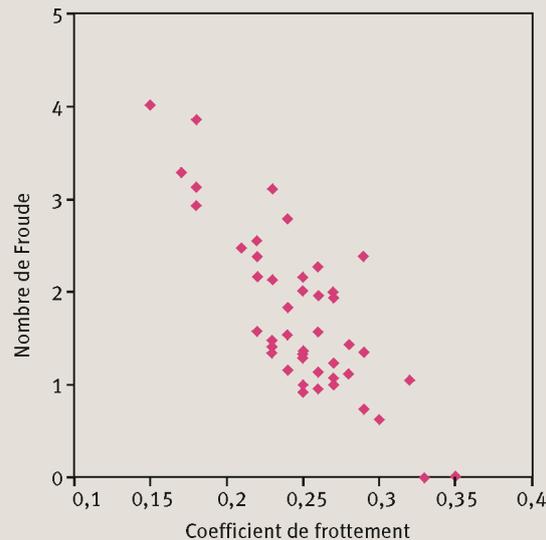
l'altitude d'arrêt des avalanches. Ces valeurs sont comprises entre 0,15 et 0,35. La figure 3a montre une corrélation significative entre l'altitude d'arrêt et le coefficient de frottement μ_0 . Nous avons également reporté ce dernier en fonction du volume afin de montrer la faible corrélation entre le volume et le coefficient de frottement (figure 3b). Pour chaque avalanche, les variations de hauteur et de vitesse en fonction du temps à l'entrée de la zone d'arrêt (altitude 1 240 m) ont été calculées et analysées. Le nombre de Froude* F (i.e. la racine carrée du ratio entre les énergies cinétique et potentielle :

$$F^2 = \frac{U^2}{gH}$$

correspondant au débit maximal a été déterminé pour chaque avalanche. Les nombres de Froude obtenus sont reportés sur la figure 3c. Ces derniers sont très corrélés au coefficient de frottement μ_0 (valeur du frottement près de l'arrêt), mais leur corrélation avec les volumes de d'avalanche est inférieure à 0,3 (figure 3b). Nous considérons donc dans les sections suivantes que ces deux descripteurs de l'avalanche – nombre de Froude et volume – sont quasi-indépendants.

Volume d'avalanche et nombre de Froude continentaux

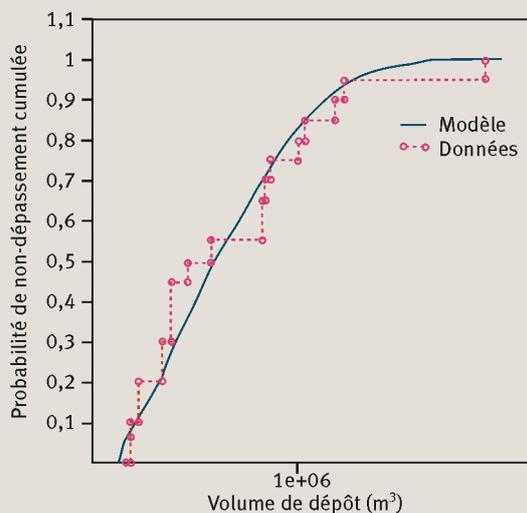
La prédétermination requiert l'introduction d'un modèle probabiliste dont les données sont considérées comme des réalisations. Le modèle correspond à une famille de lois de probabilité caractérisée par un jeu de paramètres noté θ et la difficulté est d'estimer θ . La modélisation « Peak Over Threshold » (POT*), consiste à ne considérer que les données dépassant un seuil. Le nombre de données utilisées est réduit mais l'ajustement des lois de probabilité se fait sur les valeurs les plus élevées des observations de sorte que les quantiles utiles à la prédétermination sont mieux évalués. Le modèle prend en compte à la fois



3c Nombre de Froude en fonction du coefficient de frottement μ_0

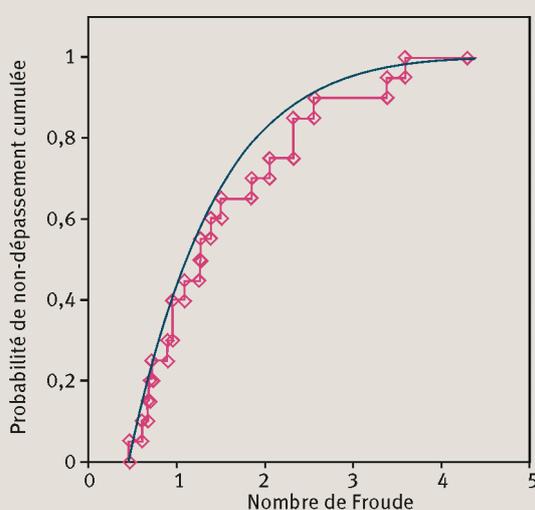
l'occurrence et l'intensité des dépassements, de sorte que le passage aux périodes de retour est direct. Enfin et surtout, le problème du choix du modèle est considérablement simplifié grâce à la convergence des dépassements vers des lois limites bien connues (Pickands, 1975). Sous réserve que le seuil m soit suffisamment élevé, la série de k dépassements indépendants sur une période T suit une loi de Poisson. Les dépassements sont distribués selon une loi de Pareto généralisée. Un rôle crucial est joué par le paramètre β caractérisant la forme de la distribution, c'est-à-dire l'événement avec la période de retour. Enfin, le principal problème pratique lié à la mise en œuvre de la modélisation POT est le choix du seuil : celui-ci doit être à la fois suffisamment haut pour converger vers le modèle asymptotique et assez bas pour conserver une quantité de données suffisante. Une bonne solution empirique pour déterminer m est de

4 Adéquation entre volumes d'avalanche observés et modèle probabiliste retenu



Source : Cemagref.

5 Adéquation entre nombres de Froude observés et modèle probabiliste retenu



Source : Cemagref.

- représenter la moyenne arithmétique des dépassements comme une fonction du seuil et de sélectionner le seuil qui correspond à la partie linéaire du graphe obtenu (Coles, 2001) :

$$p(k|\eta, T) = \frac{(\eta T)^k}{k!} e^{-\eta T} \quad 3$$

$$F(y|y \geq m, \beta, \delta) = 1 - [1 - \beta(y - m)]^{\beta/\delta} \quad \text{si } \beta \neq 0$$

$$F(y|y \geq m, \delta) = 1 - \exp(-\delta(y - m)) \quad \text{si } \beta = 0 \quad 4$$

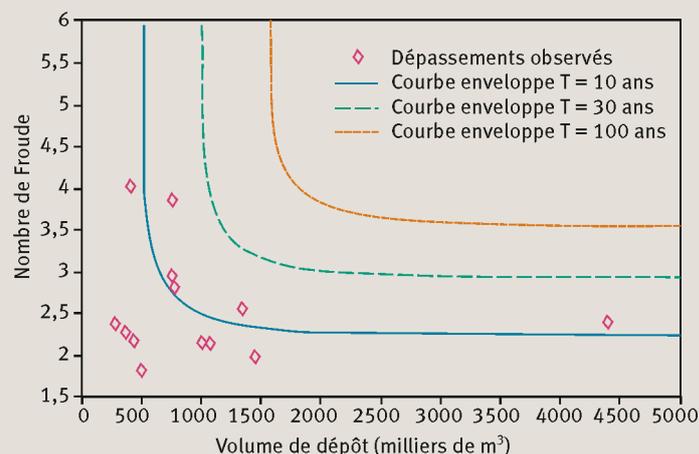
Pour les volumes, le seuil retenu est de 0,25 million de mètre cube. Nous avons systématiquement testé les trois modèles ($\beta < 0$, $\beta > 0$, $\beta = 0$) et nous avons retenu le modèle le plus adapté ($\beta < 0$). L'adéquation entre données et modèle, sans être parfaite, est satisfaisante comme le montre la figure 4. L'ajustement est très bon pour les volumes compris entre $0,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ et $1,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, mais le volume exceptionnel de 1950 reste difficile à prendre en compte. Concernant le nombre de Froude, un échantillon limité à 20 données dépassant 1,82 a été retenu pour l'analyse statistique. Le domaine d'attraction de Weibull correspondant à une valeur positive de β a été sélectionné. La distribution du nombre de Froude est ainsi bornée avec un nombre de Froude limite à 6,92. L'adéquation entre les données et le modèle est satisfaisante comme le montre la figure 5. L'inversibilité des lois de dépassement nous permet d'exprimer analytiquement les quantiles en fonction de la probabilité annuelle de non-dépassement. Les valeurs retenues pour l'événement centennal sont 3,58 pour le nombre de Froude et $1,6 \text{ Mm}^3$ pour le volume.

Il reste à combiner les résultats obtenus marginalement pour les volumes et nombres de Froude pour obtenir les événements de référence. Le traitement statistique de la distribution des valeurs extrêmes d'un processus bi-varié est un problème complexe faisant encore l'objet d'investi-

tigations. La principale difficulté réside dans l'existence d'un nombre infini de modèles limite possibles. Dans notre cas, le problème est largement facilité car les deux variables V et F sont indépendantes. La probabilité de non-dépassement d'un doublet de valeurs définissant une période de retour est simplement le produit des probabilités marginales de non-dépassement correspondantes. Il y a ainsi une relation analytique entre V et F pour une période de retour donnée par l'équation suivante :

$$F(T, V) = m_2 + \frac{1}{\beta_2} \left[1 - \left[\frac{-1}{\eta_2} \ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) - \frac{\eta_1}{\eta_2} (1 - \beta_1 (V - m_1)) \right]^{\frac{\delta_1}{\beta_1}} \right]^{\frac{\beta_2}{\delta_2}} \quad 5$$

6 Cas bivarié : courbes enveloppes pour différentes périodes de retour



Source : Cemagref.

L'indice 1 est relatif au volume, l'indice 2 est relatif au nombre de Froude.

Cette relation définit la courbe enveloppe des couples (F, V) correspondant à la période de retour T . Nous avons retenu plusieurs doublets (F, V) correspondant aux événements centennaux. Par la suite, et à titre d'exemple, nous analyserons le dimensionnement des nouveaux ouvrages de protection en considérant seulement un doublet $(F = 4,29, V = 1,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3)$, en gardant à l'esprit que nous avons considéré plusieurs autres doublets lors de l'étude technique.

Modéliser pour quoi faire ?

Objectif opérationnel : dimensionner les tas freineurs

Dans la littérature, plusieurs études ont été dédiées aux effets des tas freineurs sur des écoulements granulaires denses (Johannesson et Hakonardottir, 2003 ; Hakonardottir *et al.*, 2003). Elles ont montré que la réduction de distance d'arrêt était proportionnelle à la hauteur de l'ouvrage relativement à la hauteur de l'écoulement incident. La hauteur d'écoulement à l'entrée du dispositif est autour de 10 m. Selon Hakonardottir *et al.* (2003), la hauteur optimale des tas est 1,5 fois égale à celle de l'écoulement incident. Nous ne pouvions pas dimensionner une hauteur obéissant à cette règle car la construction de tas de 15 m d'épaisseur aurait représenté des inconvénients en termes d'impact paysager et de coût économique. Nous avons limité la hauteur des tas à 7,5 m et nous avons étudié différentes longueurs et combinaisons de tas. Pour comparer l'efficacité de différentes configurations du système de protection, nous avons eu massivement recours à la modélisation physique en modèle réduit. La pertinence de cette technique a été largement démontrée dans le cadre des projets européens CADZIE* (*Catastrophic Avalanches: Defense Structures and Zoning in Europe* – 1999-2003 EVG1-CT1999-00009) et SATSIE* (*Avalanche Studies and Model Validation in Europe* – 2002-2005 EVG1-CT2002-00059). Nous avons donc développé un modèle réduit de laboratoire pour étudier et optimiser les tas en termes de dissipation d'énergie et d'étalement de l'écoulement.

Comment modéliser ? Principes et méthodes en modèle réduit

Un modèle réduit simplifié (échelle 1:500) de la zone d'arrêt de Tacconnaz a été construit (photo 3). Le modèle est alimenté en matériaux granulaires à l'aide d'un canal incliné, à pente ajustable, et équipé d'un réservoir à l'amont où le volume de l'avalanche est initialement stocké. Une analyse dimensionnelle des équations intégrées dans l'épaisseur fait ressortir trois nombres sans dimension principaux :

- le rapport géométrique,
- le nombre de Froude,
- la différence entre l'angle de pente et l'angle de frottement $[\tan(\theta) - \mu]$.

La pente moyenne du modèle réduit est égale à la pente moyenne de la zone d'arrêt du couloir réel (13°). La pente

3 Modèle réduit en laboratoire de la zone d'arrêt inclinée à 13° et alimentée en matériau granulaire à l'aide d'un canal de pente ajustable.



© Cemagref.



© Cemagref.

4 Effets d'étalement induit par les trois rangées de tas, tests de laboratoire en modèle réduit.

ajustable du canal permet de fixer la vitesse désirée et le nombre de Froude à l'entrée de la zone d'arrêt.

Le second critère de similitude est ainsi respecté. Le matériau granulaire utilisé a été choisi après plusieurs tests de calibration. Nous avons ajouté différentes proportions de billes en PVC* (polychlorure de vinyle) de diamètre 0,1 mm à des billes de verre de diamètre 1 mm. Nous avons mesuré les distances d'arrêt obtenues pour les différentes proportions et nous avons choisi la proportion correspondant à la distance d'arrêt maximale observée. Le matériau granulaire bi-disperse* finalement retenu avait les proportions suivantes: 10 % en billes de PVC et 90 % en billes de verre. Près de l'arrêt, la valeur expérimentale de $[\tan(\theta) - \mu]$ est donc identique aux données observées sur le terrain. Nous avons considéré que le troisième critère de similitude était respecté même si cela est strictement vrai uniquement près de l'arrêt. Un des problèmes majeurs que nous avons rencontré lors des expériences est l'évaluation de l'incertitude. Du fait de conditions initiales qui ne sont jamais exactement identiques et d'un système chaotique, les distances d'arrêt obtenues pour deux tests, avec le même volume initial et le même matériau granulaire, peuvent être parfois différentes. Pour prendre en compte ces variations, nous avons systématiquement réalisé cinq essais dans



7 Dépôts obtenus par les expériences en modèle réduit (gauche) et par la modélisation numérique (bas)

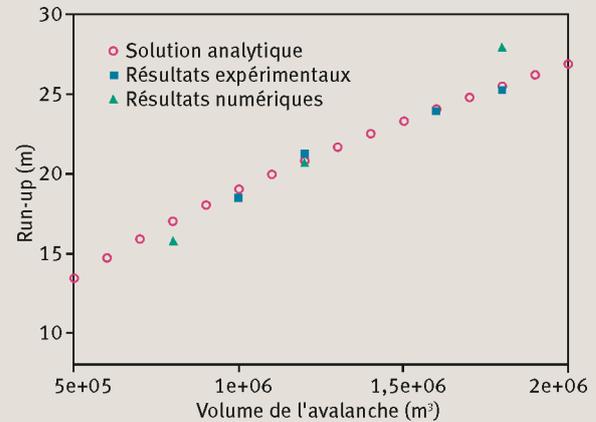


- les mêmes conditions et nous avons calculé la valeur moyenne et l'écart-type. La comparaison entre les différentes configurations a été faite en utilisant les valeurs moyennes et l'écart-type.

Les résultats obtenus sur le dimensionnement des tas

L'objectif des tas freineurs est de dissiper l'énergie et d'étaler l'écoulement. Nous avons considéré plusieurs rangées. Nous avons d'abord étudié la forme des tas et leur emplacement dans la première rangée à l'aide du modèle réduit. La largeur de l'écoulement dense à l'entrée de la zone d'arrêt est comprise entre 50 et 100 m. En termes de réduction de distance d'arrêt et d'étalement, les meilleurs résultats ont été obtenus avec deux tas de hauteur 7,5 m, avec une section ouverte inter-tas de l'ordre de 30 m. La partie centrale de la face amont de chaque tas est de forme rectangulaire de 14 m de largeur. Cette surface est orthogonale à la pente et à la direction de l'écoulement incident. Elle est prolongée de chaque côté par une surface triangulaire formant un angle de 30° avec la direction de l'écoulement incident.

8 Run-up (en m) au niveau de la digue d'arrêt terminale en fonction du volume de l'avalanche (en m³) : comparaison entre les résultats analytique, expérimental et numérique



Source : Cemagref.

La largeur totale du tas est de 30 m mais la partie efficace est de 14 m. Pour la seconde rangée de tas, nous avons conservé la même géométrie pour les tas. Nous avons mis en place un tas à l'aval en quinconce avec les deux tas de la première rangée. Nous avons fait varier la distance entre la face de ce tas et celles des tas de la première rangée et nous avons mesuré la réduction de distance d'arrêt. Les tests ont montré qu'une distance de 80 m augmente la réduction totale de distance d'arrêt de l'ordre de 10 %. De plus, l'impact au centre des jets latéraux produits par les tas de la première rangée atteignait 60 m. Nous avons ajouté deux autres tas dans la seconde rangée : un sur le côté gauche et un sur le côté droit, la surface centrale étant localisée au niveau de l'impact du jet latéral. Ces deux tas ont produit une réduction supplémentaire de distance d'arrêt jusqu'à 15 % et ont augmenté l'étalement de l'écoulement sur les deux côtés. Pour augmenter l'étalement de l'écoulement (et augmenter sa surface d'écoulement) vers le côté droit, nous avons ajouté un tas 80 m en aval de la seconde rangée. Ce tas est implanté au point d'impact du jet latéral produit par le tas à l'extrémité droite de la seconde rangée. L'écoulement est alors étalé jusqu'à atteindre les montagnes en rives droite et gauche de la zone d'arrêt (photo 4). Tous les tas finalement choisis sont visibles sur la photo 3.

Accompagner l'ingénierie paravalanche dans la conception des ouvrages : dimensionnement de la digue terminale et validation du dispositif complet

Dimensionnement de la digue terminale à l'aide d'une méthode de calcul analytique

Pour dimensionner la hauteur de la digue d'arrêt terminale, nous avons d'abord utilisé la formulation classique

empirique proposée par Salm (1982), et largement utilisée dans les études d'ingénierie. Elle est basée sur la conservation de l'énergie. La somme des énergies cinétique et potentielle ($\rho gh + I/2\rho v^2$) de l'écoulement incident est transformée en énergie potentielle de l'avalanche après arrêt (ρgR où R est le run-up* c'est-à-dire l'épaisseur maximale atteinte lors de l'arrêt) et en énergie dissipée lors de l'interaction entre l'avalanche et la digue ($I/2\gamma\rho v^2$). Cela conduit à :

$$R = h \left[1 + \frac{1-\gamma}{2gh} v^2 \right] = h \left[1 + \frac{1-\gamma}{2} F^2 \right] \quad \text{6}$$

Pour calibrer γ , nous avons utilisé le run-up observé sur l'avalanche de février 1999. Le run-up observé était au moins 3 m au-dessus de la digue terminale de hauteur 14 m. Le run-up observé a donc été estimé à 17 m. Le volume du dépôt a été estimé à $0,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Pour un écoulement canalisé, Chambon et Naaim (2009) ont obtenu une relation linéaire entre la hauteur de l'écoulement à une position donnée et le volume de l'avalanche. Cette relation peut être extrapolée aux avalanches en trois dimensions si on fait l'hypothèse que l'étalement latéral est proportionnel à la hauteur de l'avalanche. À une position donnée, la hauteur tridimensionnelle de l'avalanche sur une pente ouverte est alors proportionnelle à la racine carrée du volume. De plus, d'après la loi de frottement de Voellmy (loi de frottement obtenue en ajoutant un frottement solide à une loi de frottement de Chezy), le nombre de Froude dépend principalement de la pente et des paramètres de frottement. À une position donnée, nous pouvons alors relier, de manière simple, le run-up au volume comme suit :

$$\frac{R}{R_{1999}} = \sqrt{\frac{V}{V_{1999}}} \quad \text{7}$$

L'application de cette dernière équation conduit à un run-up d'au moins 24 m pour une avalanche de volume égal à $1,6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ avec un nombre de Froude égal à celui de l'avalanche de février 1999.

Validation de l'ensemble du système de protection à l'aide de modélisations physique et numérique

Afin de tester le système complet, nous avons d'abord utilisé le modèle numérique basé sur le système d'équations 1a, 1b et 1c et l'équation 2. La zone d'arrêt a été modélisée par une grille raffinée au pas d'espace de 1 m. La topographie de la zone d'arrêt a été modifiée pour prendre en compte les nouveaux ouvrages de protection. Chaque cellule a ensuite été représentée par ses nouvelles pentes et courbures locales. Les paramètres de frottement sont ceux de l'avalanche de référence. L'hydrographe imposé comme condition limite à l'entrée de la zone d'arrêt correspond aussi à l'événement de référence. En parallèle, nous avons utilisé le modèle réduit de laboratoire pour simuler les mêmes événements. Les deux modélisations, physique et numérique, ont montré un débordement en aval de la digue d'arrêt terminale, en particulier en rive gauche. Cet effet est principalement dû à la morphologie de site en rive gauche. En effet, en déplaçant l'actuelle digue latérale – à



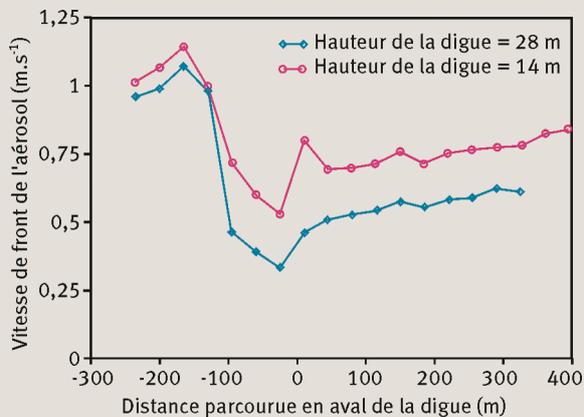
5 Exemple de simulation physique en bassin noyé.

l'est – vers la rive droite, l'écoulement peut augmenter en largeur et réduire sa hauteur côté droit, alors que la montagne en rive gauche est trop près et empêche le bénéfice d'un étalement latéral additionnel (augmentation de la largeur disponible et réduction de hauteur résultante). L'écoulement est rapidement réorienté vers la partie centrale du dispositif. Pour faire face à ce problème, nous avons complété le système de tas en ajoutant, au milieu de la zone d'arrêt, une digue transversale de 120 m en longueur et 7 m en hauteur (photo 3). Cette modification a été testée avec succès à l'aide des modélisations à la fois physique et numérique. Les dépôts obtenus sont comparés sur la figure 7. En utilisant les modèles physique et numérique, nous avons aussi fait varier le volume de l'avalanche de $0,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ à $2,0 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ et nous avons comparé le run-up obtenu au niveau de la digue terminale, puis nous avons comparé les résultats obtenus à ceux prédits par une approche analytique classique – équation 7 – comme l'illustre la figure 8. Dans ce cas d'étude, les prédictions de l'approche analytique sont très voisines des résultats obtenus sur la base de la modélisation numérique et des tests en modèle réduit de laboratoire.

Effets des avalanches aérosol

La modélisation de la partie poudreuse de l'avalanche a été conduite à l'aide des modélisations physique et numérique. Le moteur de l'écoulement des avalanches poudreuses est le résultat de l'action de la gravité sur la différence de densité qui existe entre l'avalanche aérosol (fluide lourd) et l'air ambiant (fluide léger). Les avalanches aérosols, composées d'air et de particules de neige, sont assimilées donc à des courants de densité. Dans la simulation physique dans un bassin noyé de laboratoire de grande taille, le fluide lourd est modélisé par de l'eau salée additionnée de kaolin permettant de visualiser l'écoulement et le fluide léger par de l'eau (photo 5). Pour appliquer les résultats de la simulation physique aux avalanches réelles, il a fallu établir, à partir des lois de conservation de la mécanique des fluides, trois critè-

9 Rapport entre les vitesses de front de l'aérosol sans digue et avec digue en fonction de la distance parcourue en aval de la digue



Source : Cemagref.

10 Rapport entre les pressions de l'aérosol avec une digue de 25 m et une digue de 14 m en fonction de la distance parcourue en aval de la digue



Source : Cemagref.

► res de similitude. Le premier critère est le rapport de la force d'inertie à la force visqueuse appelé similitude de Reynolds ($\frac{UH}{\nu}$). Il agit comme un seuil qu'il faut dépasser

pour assurer un écoulement turbulent pleinement développé. U et H sont respectivement la vitesse de front et la hauteur de l'avalanche et ν est la viscosité. Le second critère de similitude, appelé nombre densimétrique de Froude, est le rapport de la force d'inertie à la force de

gravité ($\frac{U}{\sqrt{g \frac{\Delta\rho}{\rho} H}}$). $\Delta\rho$ est la différence de densité entre

le fluide lourd et le fluide ambiant, ρ est la densité du fluide ambiant. Le dernier critère est le rapport des densités qui ne peut être respecté car il conduirait à des dimensions de bassin trop importantes ; ainsi, le rapport des densités (densité du fluide lourd/ densité du fluide léger) en laboratoire est de 1,2 alors qu'il est de 4 à 10 au sein des avalanches réelles. Tous les critères de similitude ne peuvent donc être respectés et les expériences menées conduisent à des taux de croissance d'avalanche trop importants (Naaim-Bouvet *et al.*, 2009). C'est pourquoi un modèle numérique similaire à celui décrit dans Sampl *et al.* (2004) a d'abord été utilisé pour simuler ces tests expérimentaux, avec un rapport de densité égal à la valeur expérimentale, afin de valider le modèle numérique. Puis nous avons utilisé un rapport de densité réaliste (plus élevé) pour analyser l'effet de la digue sur la pression de l'avalanche poudreuse en aval de la digue terminale.

Modélisation physique en modèle réduit

Une série d'expériences a ainsi été conduite dans un bassin noyé de 20 m³ à l'échelle du 1:350 simulant

une avalanche de hauteur 50 m, de vitesse de front de 30 m s⁻¹ et avec un rapport de densité moyen (densité de l'écoulement sur densité du fluide ambiant) de 1,2 s'écoulant sur une pente de 10°. Deux digues de 0,04 m et 0,08 m, correspondant respectivement à des digues réelles de hauteur 14 m et 28 m, ont été testées. Les résultats obtenus sont reportés sur la figure 9. Si nous comparons les vitesses de front, nous pouvons voir clairement qu'une digue de hauteur 28 m ne retient pas, bien évidemment, l'avalanche poudreuse, mais la vitesse de front est fortement réduite par rapport à la digue de 14 m.

Simulations numériques

Une série de simulations numériques a également été conduite pour étudier le cas d'une avalanche poudreuse de 50 m de hauteur, de vitesse de front de 30 m s⁻¹ avec un rapport de densité moyen de 1,2 puis 4 s'écoulant sur une pente de 10°. Deux digues, de 14 m et 25 m en hauteur, ont été considérées. La première série de tests, avec un rapport de densité de 1,2 et la digue de 14 m, a permis de démontrer la validité des simulations numériques comparées aux tests de laboratoire. La seconde série de simulations, avec un rapport de densité égal à 4, a été dédiée à la prise en compte de l'effet de la densité qui réduit l'incorporation du fluide ambiant comme montré par Sampl *et al.* (2004). Les simulations ont montré que l'augmentation de la hauteur de digue conduit à une réduction de pression partout en aval de la digue. Au niveau des zones habitées (figure 10), la pression est réduite jusqu'à 50 % par la digue de hauteur 25 m comparée à celle de 14 m, ce qui constitue un gain significatif en termes de réduction du risque résiduel lié à la pression d'impact de l'avalanche en aérosol.

Conclusion et perspective

Grâce aux développements scientifiques récents, il est possible de résoudre un problème d'ingénierie paravalanche lié au dimensionnement d'un système de défense basé sur des ouvrages de protection passive.

La combinaison des données historiques et des modèles numériques de propagation a été utilisée avec succès pour prédéterminer les événements de référence, même dans le cas d'un problème multi-varié. Cette étude envisage le volume de l'avalanche et le nombre de Froude comme les deux descripteurs pour définir l'événement de référence et étudier son interaction avec les obstacles. Ces deux paramètres ont été considérés comme relativement indépendants, les recherches futures devant s'attaquer au problème de la possible dépendance entre les descripteurs de l'écoulement. Il est important de noter que cette étude n'aurait pas pu être menée à ce niveau de détail si les données historiques avaient été plus rares, ce qui est le cas dans la majorité des couloirs d'avalanche. Ainsi, le transfert de la connaissance existante sur un site vers un autre représente également un challenge scientifique et technique à l'avenir.

La modélisation physique sur modèle réduit des avalanches de neige denses, largement éprouvée dans les développements scientifiques récents, a été utilisée ici comme un outil pour l'ingénierie. À l'aide d'une procédure spécifique, nous avons montré comment un choix particulier du matériau granulaire peut permettre de respecter les critères de similitude requis. Un matériau granulaire bi-disperse constitué de particules fines de PVC et de particules de verre plus grossières a été utilisé. Le choix d'une proportion faible en particules fines dans le mélange a montré la pertinence du modèle réduit pour simuler les dépôts observés, non seulement en termes de distance d'arrêt maximale mais aussi en termes de caractéristiques générales du dépôt (distribution spatiale de la masse, effets de digitation* et langues d'avalanche*).

La modélisation numérique, basée sur les équations intégrées sur l'épaisseur établies à partir de l'hypothèse de couche mince, peut être appliquée pour le dimensionnement d'ouvrages de protection incluant une topographie complexe. La modélisation numérique des

avalanches denses a été testée avec succès sur les données expérimentales et a été utilisée comme un outil opérationnel pour dimensionner un dispositif paravalanche complexe. Un point crucial est ici le modèle de dépôt-érosion implémenté dans le modèle, ce qui permet de mieux simuler l'avalanche dans la zone d'arrêt (transition vers l'arrêt) et les effets des obstacles. Ce modèle, validé pour les matériaux granulaires en pente, a encore besoin d'être amélioré et validé à l'aide de données disponibles sur des observations grandeur nature. ■

Les auteurs

Mohamed Naaim

Cemagref, centre de Grenoble,
UR ETGR, Érosion torrentielle,
neige et avalanches,
2 rue de la Papeterie,
BP 76,
38402 Saint Martin d'Hères Cedex
mohamed.naaim@cemagref.fr

Thierry Faug

Cemagref, centre de Grenoble,
UR ETGR, Érosion torrentielle,
neige et avalanches,
2 rue de la Papeterie,
BP 76,
38402 Saint Martin d'Hères Cedex
thierry.faug@cemagref.fr

Florence Naaim-Bouvet

Cemagref, centre de Grenoble,
UR ETGR, Érosion torrentielle,
neige et avalanches,
2 rue de la Papeterie,
BP 76,
38402 Saint Martin d'Hères Cedex
florence.naaim@cemagref.fr

Nicolas Eckert

Cemagref, centre de Grenoble,
UR ETGR, Érosion torrentielle,
neige et avalanches,
2 rue de la Papeterie,
BP 76,
38402 Saint Martin d'Hères Cedex
nicolas.eckert@cemagref.fr

QUELQUES RÉFÉRENCES CLÉS...

- CHAMBON, T., NAAIM, M., 2010, Scaling relationships for constant volume flowing snow avalanches, *Annals of Glaciology*, 51 (54), p. 129-138.
- COLES, S., 2001, *An introduction to statistical modelling of extreme values*, Springer, 208 p.
- HAKONARDOTTIR, K.M., HOGG, A.J., JÓHANNESSON, T., TÓMAASSON, G.G., 2003, A laboratory study of the retarding effects of braking mounds on snow avalanches, *Journal of Glaciology*, n° 49 (165), p. 191-200.
- JOHANNESSON, T., HAKONARDOTTIR, K.M., 2003, *Remarks on the design of avalanche braking mounds based on experiments in 3, 6, 9 and 34 m long chutes*, Rapport technique IMO, n° 03024.
- NAAIM, M., FAUG, T., NAAIM-BOUVET, F., 2003, Dry granular flow modelling including erosion and deposition, *Surveys in Geophysics*, n° 24 (5-6), p. 569-585.

► Consulter l'ensemble des références sur le site de la revue www.set-revue.fr