

Mise au point d'une méthode de prédétermination statistique des cotes d'arrêt d'avalanches

Statistical probability predetermination of avalanche runout altitudes using a combination of deterministic model and well documented data base

par Maurice Meunier, C. Ancey et Mohamed Naaim

Cemagref ETNA Grenoble

Studying snow avalanches using a statistical approach raises several issues. First, even in the heavy populated areas in the Alps, there are few relevant data on avalanche motion or extension. Second, most of the field data are related to the point of furthest reach in the avalanche path (run-out distance or altitude). As data of this kind are tightly dependent on the avalanche path profile, it is a priori not permissible to extrapolate the cumulative distribution function fitted to these data without severe restrictions or further assumptions. Here, in order to overcome this issue, we propose a novel methodology. First, using an avalanche-dynamics numerical model, we fit the model parameters (two friction coefficients and the volume of snow involved in the avalanches) to the field data. Then, as these parameters are random variables, we adjust appropriate statistical distributions. The third step involves simulating a large number of (fictive) avalanches using a Monte Carlo approach. In this way, the cumulative distribution function of the run-out distance can be computed on a much broader range than initially with the historic data.

INTRODUCTION

Les avalanches font l'objet de très nombreuses tentatives de modélisation : dans le cadre du projet européen SAME [1], on a ainsi fait le recensement d'un très grand nombre de modèles (50 au total). Pour les modèles déterministes, un des gros problèmes rencontrés est qu'on a énormément de mal à déterminer leur domaine de validité : d'une part, on ne connaît pas vraiment la nature du fluide en écoulement ; d'autre part, les données macroscopiques recueillies sur des événements ponctuels ne sont pas assez nombreuses ni assez complètes ni assez sûres pour qu'on puisse procéder par calage-validation des modèles. Un des gros problèmes est qu'il n'y a pas de variable qui pourrait jouer le même rôle que le débit pour les crues : il y a seulement la délimitation du dépôt terminal, le contour de l'avalanche pendant son déplacement, et dans les cas favorables la délimitation de la zone de départ. Parfois, mais rarement, des observateurs heureusement présents et particulièrement avertis, peuvent donner des indications sur la vitesse de l'écoulement. Parfois aussi, des circonstances favorables fournissent des indications sur les temps de passage. Mais, en règle générale, surtout pour les événements anciens, la documentation existante est sommaire, et souvent peu fiable. Dans ces conditions, on comprend que la question de savoir si un modèle déterministe de propagation d'avalanche est meilleur que d'autres, ne peut être tranchée à l'heure actuelle sur la base d'une confrontation avec des données de terrain. Les spécialistes les ont parfois comparés dans un effort louable de clarification en les confrontant à des événements réels extrêmes (par exemple

[2], [3]) mais en dégageant essentiellement les convergences entre modèles et se contentant d'une étude de sensibilité sur certains paramètres. Au total, il faut bien admettre que les modèles déterministes d'écoulement sont encore grandement spéculatifs. Il y a eu bien sûr des tentatives pour en caler les paramètres, notamment sur la distance ou la cote d'arrêt dans le but précieux mais limité de mieux cerner leurs valeurs pour les événements extrêmes ([4], [5]), ou bien d'établir une correspondance entre les valeurs des paramètres et la nature de la neige en écoulement [6]. En multipliant cette démarche sur un grand nombre de couloirs et en en faisant une synthèse raisonnée, par connaissance experte autant que par analyse des résultats des modélisations numériques, on peut aboutir finalement à une méthodologie d'ingénierie assez achevée, valable régionalement, comme celle qui est utilisée en Suisse [7].

Les modèles statistiques aussi ont de lourds handicaps : la variable la plus accessible aux mesures, la cote ou la distance d'arrêt, n'est pas intrinsèque au phénomène, car elle est liée à la nature du profil en long. Caler une loi théorique sur les variables naturelles, n'a donc guère de sens, et on peut difficilement extrapoler les distributions statistiques obtenues, comme on le pratique en hydrologie. De nombreuses études statistiques ont donc été faites à partir d'un profil « idéalisé » schématisé par une parabole. Les précurseurs [8] ont constaté sur leur site d'étude l'existence d'un point stratégique pour l'écoulement, le point de décélération, correspondant à un angle du profil en long de 10°. Ces études ont privilégié comme variable la distance d'arrêt directement, ou le rapport

des longueurs de tronçons séparant les points de départ et d'arrivée du point de décélération, ou encore, les angles correspondants. La plupart des chercheurs ont utilisé d'emblée un grand nombre de couloirs, supposant une cohérence régionale de l'événement avalancheux [9], [10], [11], [12]. Ces résultats statistiques régionaux peuvent être utilisés pour définir la distance maximale d'arrêt sur des couloirs d'avalanche où l'on possède peu de données [13]. Enfin, combiné avec la connaissance d'une distribution des occurrences d'avalanches, elle aussi obtenue régionalement la plupart du temps, on peut alors caractériser en distance et en durée de retour les avalanches extrêmes [14].

L'objectif avoué de toutes ces méthodes, qu'elles soient de type déterministe ou statistique, est de déterminer l'avalanche « extrême » adopté comme aléa de référence pour déduire un zonage de risques ou élaborer une protection. Mais chacune a une part d'incertitude liée par exemple à la plus ou moins grande confiance dans la régionalisation et la simplification de la dynamique des avalanches pour les méthodes statistiques, dans la loi de comportement supposée du fluide composant les avalanches pour les modèles déterministes

L'objectif de la méthode proposée ici est d'appliquer la méthode de Monte-Carlo pour simuler avec un modèle déterministe un grand nombre d'événements fictifs. On peut alors déduire une loi statistique de l'échantillon simulé [15]. Ceci a déjà été pratiqué dans le cadre des démarches statistiques exposées ci-dessus [16] ; et également en ingénierie avec le modèle VSG [17], en adoptant les règles empiriques et/ou expertes admises en ingénierie des avalanches, pour obtenir une estimation probabilisée conjointe de la vitesse en tout point et de la cote d'arrêt. Il n'y a pas de calage des paramètres sur des données de terrain, qui ne servent qu'à vérifier la cohérence globale des résultats. On propose par contre ici d'utiliser les données de terrain d'un couloir donné (distances ou cotes d'arrêt des avalanches, cotes de départ, volumes) pour caler un modèle numérique, d'utiliser les valeurs des paramètres ainsi obtenues pour caler des lois statistiques, et de traiter alors la phase de simulation par la méthode de Monte-Carlo. Comme l'échantillon des événements simulés peut avoir la taille que l'on souhaite, on obtient alors une loi statistique finale de la cote d'arrêt qui permet, par interpolation, de déterminer les cotes d'arrêt de probabilité de non-dépassement de l'ordre de 10^{-3} ou plus.

I ■ OBTENTION DES DONNÉES DE TERRAIN ET CHOIX DU MODÈLE

On trouve en France les données de terrain dans la base de données appelée Enquête Permanente sur les Avalanches (EPA) [18] qui contient les dates, cotes de départ et d'arrivée, ainsi que des informations qualitatives (type de temps, vent, température, description sommaire du phénomène et surtout des dégâts s'il y en a) pour un grand nombre de couloirs d'avalanche en France. L'observation a commencé au début du siècle. Des informations complémentaires, relatives notamment aux dimensions du dépôt d'avalanche, peuvent être trouvées dans les « carnets forestiers » remplis par les mêmes techniciens, mais dont les informations ne sont pas saisies dans la base de données EPA. On peut donc parfois estimer le volume de l'avalanche en mouvement connaissant celui de son dépôt. Il n'y a pas d'information sur le type de l'avalanche ; mais, comme il est généralement admis que les avalanches aérosols y sont couramment notées, on en conclut

lorsque ce n'est pas le cas, que l'EPA concerne les avalanches coulantes.

Deux familles de modèles numériques sont utilisées [19], [20] : soit ils sont basés sur une extension des équations de Saint Venant (par exemple [21], [22]) avec l'utilisation éventuelle d'une loi de comportement non-newtonienne ; soit ils reposent sur l'approximation du mouvement d'un solide indéformable où les forces sont appliquées au centre de masse (par exemple [3], [4], [5], [7]). Nous adopterons ici la deuxième voie, car la littérature présente plus d'essais avec ce type de modèles, ce qui nous permettra de comparer les valeurs des paramètres de frottement que nous obtiendrons. Les équations du mouvement se formulent assez aisément et on peut les résoudre analytiquement pour une topographie simplifiée, par exemple pour un plan incliné. Lorsque la pente du profil varie le long du couloir, on peut traiter le problème différentiel. Les auteurs de ces modèles ont adopté une force de frottement en deux termes : le premier fonction de la composante normale du poids par l'intermédiaire du paramètre classique μ de frottement solide, qui peut donc être confronté à la pente du profil en long ; le deuxième terme est fonction de la vitesse, souvent de son carré, (avec un paramètre noté ξ). Les différences entre auteurs proviennent de variations sur l'expression de ces pertes de quantité de mouvement (prise en compte par exemple du fait que l'avalanche est confinée ou s'écoule sur un versant) et aussi sur le mode de résolution de l'équation du mouvement.

Nous adopterons l'équation de base de la formulation du modèle dit de Voellmy :

$$\frac{du}{dt} = g \cos \theta (\tan \theta - \mu) - \frac{g}{\xi H} u^2 \quad (1)$$

où u est la vitesse locale, θ la pente locale, H la hauteur de l'avalanche, ξ et μ étant les deux coefficients des deux lois de frottement, supposés eux aussi constants tout le long de l'écoulement. La variante dite VSG [7] du modèle de Voellmy utilise le rayon hydraulique au lieu de la hauteur. Dans notre contexte, comme les hauteurs des avalanches ne sont pas toujours connues, et qu'il faudra alors les fixer arbitrairement, ce raffinement semble peu judicieux. Cela signifie en conséquence que l'incertitude sur les valeurs des coefficients de frottement traduira la non prise en compte du confinement de l'écoulement. De plus, dans la résolution de cette équation utilisée dans ce travail, la hauteur H ne varie pas dans l'écoulement. Il s'agit d'une hauteur fictive qui a pour seule ambition de traduire le volume de neige mobilisé par l'avalanche, lorsque cette information existe.

Il y a au total de nombreuses simplifications : (i) hauteur d'écoulement invariable dans l'écoulement et parfois prise identique pour tous les événements avalancheux, (ii) non prise en compte de la sinuosité, des pertes de charge singulières, des effets bidimensionnels lors de l'arrivée sur le cône terminal, (iii) non prise en compte de la reprise de neige pendant l'écoulement, (iv) méconnaissance de la densité moyenne réelle et adoption d'une masse volumique constante pendant l'écoulement et identique pour tous les événements, (v) non prise en compte des effets inertiels (centrifuges). De plus, la représentation du mouvement à l'aide de ces deux lois de frottement n'est pas vraiment validée par un nombre suffisant de mesures expérimentales. La suite de l'étude devra donc dire si un modèle aussi simplifié, voire simpliste peut répondre à notre problème.

II ■ LE COULOIR D'AVALANCHE

Nous allons utiliser pour illustrer cet article un couloir d'avalanches de la vallée de Chamonix (Haute-Savoie) dont le profil en long n'est pas parabolique. Il est situé en rive gauche de l'Arve, le point le plus élevé (3 650 m) est proche de l'Aiguille du Midi, mais la zone d'apport a pour altitude maximale 2 750 m [23]. Elle est assez importante (aux alentours de 50 ha) et relativement uniforme quoique ayant deux niveaux séparés. Elle se termine par une concentration dans le couloir proprement dit, qui frôle la plate-forme d'entrée du tunnel du Mont Blanc (1 275 m) avant de déboucher sur le cône de déjections du torrent de la Creusaz, immédiatement adjacent, qui constitue sa zone d'arrêt. Sa pente moyenne est de 22 % alors que celle du couloir depuis la cote 2 750 m est de 46 % (dénivelée égale à 1 660 m pour une distance horizontale de 3 390 m).

La figure 1 donne le profil en long et l'évolution des pentes locales : entre les abscisses 2 800 m et 5 100 m, il y a une succession d'augmentations et de diminutions de pente. On a aussi fait figurer le point théorique de décélération des avalanches extrêmes (pente 17 %) ainsi que le point de réduction de la vitesse détecté à partir des simulations numériques, qui a une position constante quelles que soient les valeurs adoptées pour les paramètres du frottement. Ces deux points diffèrent notablement. On en déduit que le couloir des Favrands n'est guère favorable à l'utilisation des méthodes statistiques régionales basées sur l'hypothèse du profil parabolique.

Les données collectées dans l'EPA sont les cotes d'arrêt et de départ enregistrées depuis 1906 ; et dans les « carnets forestiers », on trouve les trois dimensions du dépôt de chaque avalanche entre le début de la période d'observation et 1971. Ces données possèdent une certaine incertitude. S'il y a des erreurs, il n'est pas possible de les corriger. Tout au plus, peut-on en suspecter quelques-unes lorsque leur incohérence est trop grande. Leur utilisation devra donc être particulièrement circonspecte. A partir des trois dimensions des dépôts des avalanches et de considérations géométriques, on a déduit une estimation des volumes. Pour en déduire les hauteurs des avalanches en écoulement, on a admis les hypothèses suivantes : la hauteur la plus faible est égale à 3 m ; les hauteurs maximales imaginables sont de l'ordre de 12-15 m. ; les dimensions des volumes d'avalanche en mouvement sont

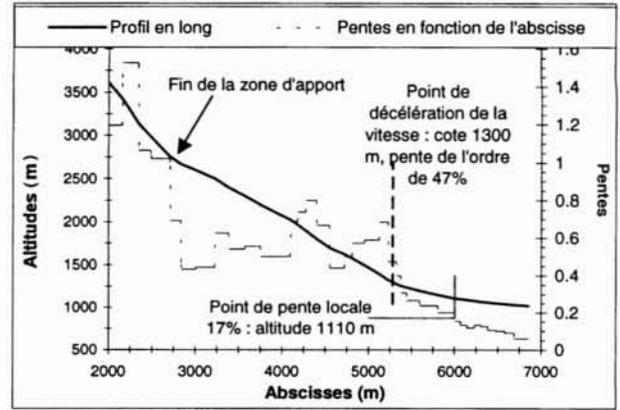


Figure 1 : Profil en long et évolution des pentes locales du couloir des Favrands.

reliées par les deux relations suivantes : $\text{largeur} = \alpha * \text{hauteur}^{0.7}$ $\text{longueur} = \beta * \text{hauteur}^{0.3}$. On obtient finalement la relation suivante :

$$\text{hauteur} = 3 + 0,005 * \text{Volume}^{0.5} \quad (2)$$

On en déduit les hauteurs représentatives des volumes des événements réels qui seront adoptées dans l'utilisation du modèle numérique. Comme on ne possède des données de hauteur que sur la période 1906-75, on considèrera que cette période (70 ans) est représentative. On en a vérifié la stationnarité (test de Lang [24]).

III ■ CONFRONTATION DIRECTE DES DONNÉES DE L'EPA ET DU PROFIL EN LONG

La figure 2 montre le profil en long (par les pentes locales et non l'altitude) ainsi que les cotes d'arrêt et de départ avec leur nombre : les cotes de départ sont étalées et certaines correspondent à des ralentissements (pente 45 %) ce qui peut sembler un peu contradictoire ; de même, les cotes d'arrêt sont toutes placées au-dessus du point théorique de décélération de 10°, et certaines (vers 1 300 m) correspondent à la fin d'une augmentation de pente (passage de la pente de 60 % à 67 % puis 47 %), ce qui peut aussi sembler un peu juste pour

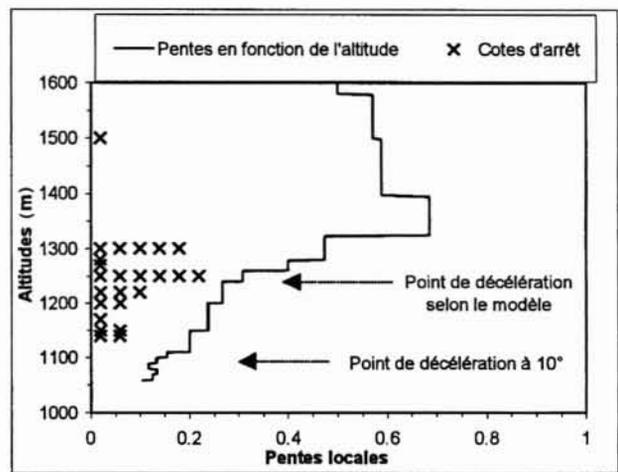
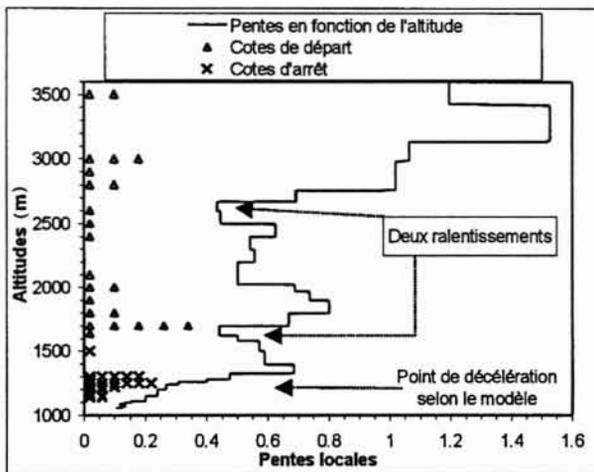


Figure 2 : Comparaison du profil en long et des cotes d'arrêt et de départ de l'EPA.

que s'y arrêtent autant d'avalanches. On en conclut que les cotes fournies par la base de données EPA ne sont pas toujours en concordance avec la dynamique des avalanches calculée par le modèle numérique. Sur la base de ces informations, on peut estimer que les cotes indiquées dans l'EPA ont une incertitude de l'ordre d'au moins $\pm 30-50$ m ; ceci n'est d'ailleurs pas inconcevable, compte tenu de la façon dont ces données ont été recueillies.

Le graphique 2 montre également que les deux plages de ralentissement (vers 1 600-1 700 m et vers 2 500 m) peuvent être le lieu d'arrêt d'avalanches qui ont alors plus de chances de ne pas être recensées dans la base EPA. Il sera donc important dans la simulation de ne pas générer d'avalanches s'arrêtant dans ces deux zones.

IV ■ PROBLÈME DE L'EXISTENCE DE DEUX PARAMÈTRES DE CALAGE DU MODÈLE

Il est bien connu depuis longtemps [5], [25] qu'il y a une infinité de couples de valeurs permettant de caler un modèle à deux paramètres à partir d'un seul type de données. C'est d'ailleurs ce qui complique la comparaison des modèles entre plusieurs auteurs [3].

Les courbes (ξ, μ) de la figure 3 représentatives de 4 événements (3 extrêmes, 1 moyen) délimitent un domaine, où, dans l'optique qui est la nôtre, il est légitime de s'attendre à trouver des points représentatifs d'autres événements avalancheux. Une piste de recherche consisterait à travailler avec des lois de probabilité à deux variables. Cette attitude serait légitime car la traduction du frottement par deux termes (équation 1) est largement empirique et la part de chaque terme ne fait que l'objet de spéculations dans l'état actuel des connaissances [5]. On pourrait donc traiter le problème en restant entièrement dans le domaine aléatoire. On le traite néanmoins ici comme un problème à une seule variable en fixant la valeur de ξ , adoptant ainsi le cadre des praticiens pour lesquels ξ traduit la nature du couloir et ne varie pas d'une avalanche à une autre. Comme notre travail est exploratoire et que le modèle numérique adopté ici n'est pas celui des praticiens, nous préférons effectuer le travail de calage pour deux valeurs de ξ : 500 et 1 500 et nous comparerons les résultats obtenus.

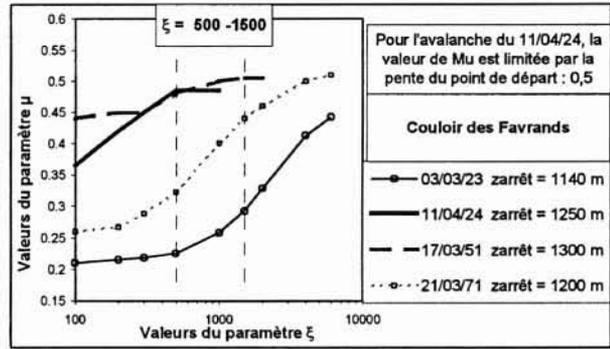


Figure 3 : Couples de valeurs (ξ, μ) permettant d'obtenir la cote d'arrêt réelle pour quatre avalanches.

V ■ RÉSULTATS DU CALAGE DU MODÈLE POUR DEUX VALEURS DE ξ

Le calage du modèle sur les événements de la période 1906-1975 a été effectué pour les valeurs de ξ égales à 500 et 1 500. Pour chaque événement, on a cherché la valeur de μ donnant la cote d'arrêt la plus proche de celle de l'EPA. Il y a une valeur de μ et une seule par événement. La figure 4 compare les cotes d'arrêt calculées et mesurées et montre que les cotes situées juste en-dessous de la cote 1 300 m donc en dessous d'une accélération de pente, ne peuvent être retrouvées par le calcul. Cela est d'autant plus vrai que la valeur de ξ est forte (fig. 4b) : puisque la vitesse est plus grande, l'inertie conduit l'avalanche à s'arrêter plus loin.

Sur la base de l'adéquation des cotes d'arrêt calculées et mesurées, et en admettant qu'il n'y a pas eu d'erreurs dans la détermination de ces données de terrain, il vaudrait donc mieux choisir une valeur faible de ξ . Ceci est conforté par

Variable à expliquer	Variables explicatives		
	Zarrêt	Zarrêt, H	Zarrêt, H, Zdépart
μ à $\xi = 500$	0,89	0,986	0,971
μ à $\xi = 1 500$	0,64	0,85	0,86

Tableau 1. — Coefficients de régression multiple avec introduction progressive des variables

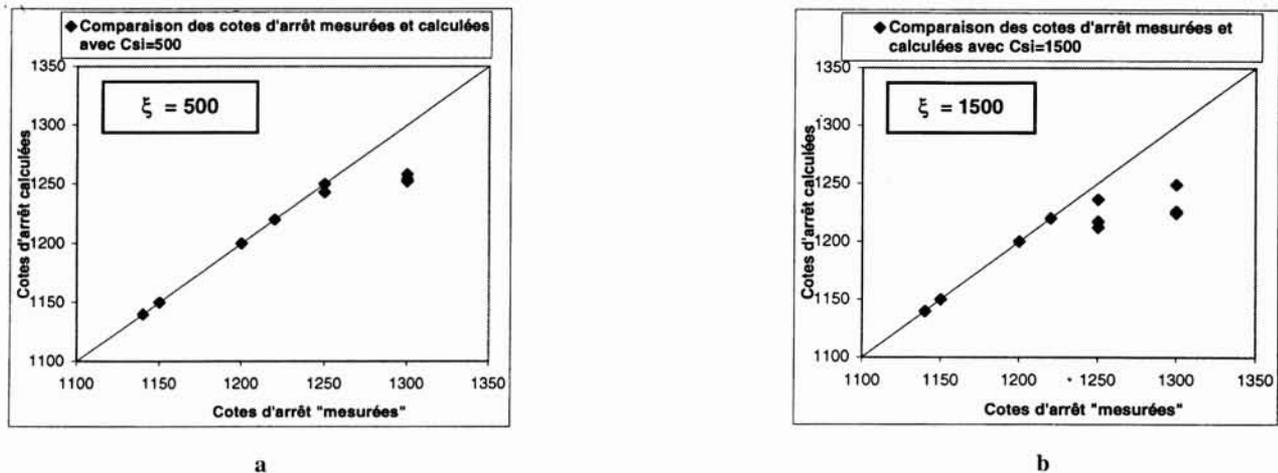
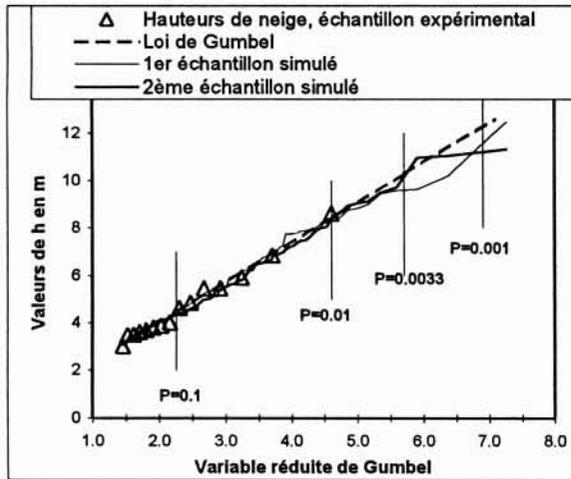
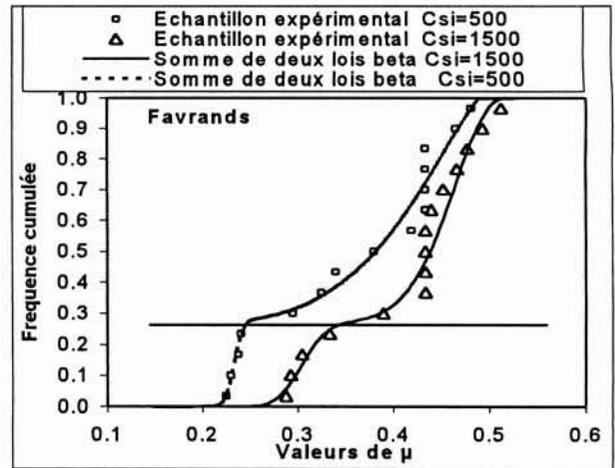


Figure 4 : Confrontation des cotes d'arrêt calculées et mesurées. Couloir des Favrandts.



(a)



(b)

Figure 5 : Adéquation (a) d'une loi de Gumbel aux hauteurs d'écoulement et (b) d'une somme de deux lois bêta aux valeurs de μ .

l'examen des coefficients de régression multiples avec introduction progressive des variables explicatives Zarrêt, H puis Zdépart. Le tableau 1 montre en effet que la configuration des variables obtenue avec $\xi = 500$ est meilleure.

VI ■ CHOIX DES LOIS STATISTIQUES ET SIMULATION

Comme la période 1906-1975 contient 15 événements, pour simuler une période de 1 000 ans, il nous faut générer un échantillon de 214 événements avalancheux. Pour cela, il nous faut les lois statistiques de H et de μ .

● VI.1 Hauteurs d'écoulement et loi de Gumbel

Dans notre contexte où la hauteur d'écoulement n'est qu'une traduction du volume de l'avalanche et ne varie pas dans l'écoulement, on peut considérer qu'il s'agit d'une variable hydrologique et non d'une variable dynamique ; or, la loi de Gumbel est souvent efficace pour rendre compte de la variabilité statistique de ce type de variable vers les grandes valeurs. Si nous l'essayons, nous obtenons le graphique 5a) qui montre la bonne qualité de son adéquation. Elle montre aussi la cohérence avec l'échantillon original de deux échantillons simulés. On voit que la hauteur d'écoulement qui a une chance sur mille de se produire chaque année, est de l'ordre de 10-14 m. C'est avec l'un de ces échantillons de 214 hauteurs d'écoulement que nous ferons le calcul des cotes d'arrêt simulées.

● VI.2 Paramètre μ et somme de deux lois bêta

Autant la représentation des hauteurs d'écoulement par une loi statistique ne pose a priori pas de problème, autant celle des valeurs du paramètre dynamique semble n'avoir jamais été abordée, à notre connaissance. On peut sélectionner une loi bornée puisque il est admis que μ varie entre deux bornes [26], avec des fourchettes peu variables selon les auteurs (de 0,1-0,15 à 0,5-0,6). La loi bêta répond bien à ce critère. De plus l'histogramme des valeurs de μ peut s'avérer très divers et dans le cas du couloir des Favrands, il est bimodal, ce qui nous conduit à proposer une somme de deux lois bêta. En

adoptant 0,15-0,52 comme fourchette des valeurs de μ , nous pouvons calculer les lois bêta correspondant aux deux pointes des échantillons expérimentaux. La figure 5b) indique la bonne adéquation aux données.

C'est à partir de ces deux lois que nous pouvons effectuer le tirage au hasard des 214 valeurs de H et de μ qu'il faut utiliser dans le calcul des cotes d'arrêt des avalanches avec le modèle d'écoulement.

● VI.3 Simulation

Les deux échantillons simulés de μ correspondant aux deux valeurs de ξ ont été calculés avec le même jeu de 214 nombres tirés au hasard entre 0 et 1 ; dans le même esprit, pour calculer les cotes d'arrêt avec le modèle, on les a utilisés avec le même échantillon simulé de la hauteur d'écoulement (fig. 5a), ce qui permet de comparer les résultats finaux sans que leurs différences puissent être attribuées au tirage au hasard. Les deux lois statistiques résultantes figurent sur le graphique 6, en même temps que les échantillons des cotes d'arrêt calculées initialement pour déterminer les valeurs de μ (et non les valeurs données dans l'EPA).

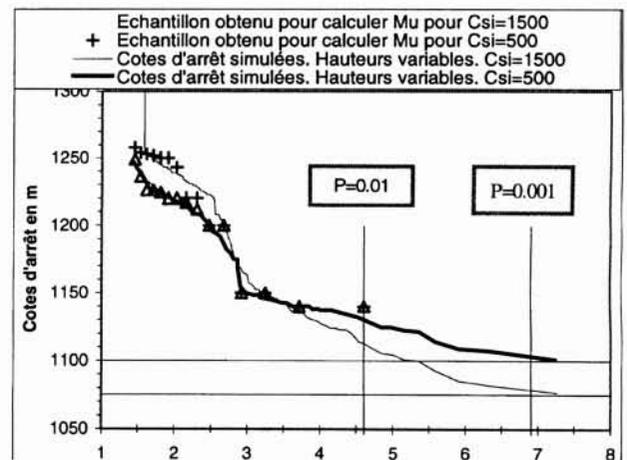


Figure 6 : Lois statistiques des échantillons de cotes d'arrêt simulées du couloir des Favrands.

On voit que les échantillons simulés suivent bien les échantillons expérimentaux recalculés, qui sont d'ailleurs confondus en dessous de la cote 1 200 m et différent au dessus. Cette différence est conservée dans les échantillons simulés de cotes d'arrêt : en conséquence, les calculs faits avec $\xi = 1\,500$ donnent des résultats plus pessimistes qu'avec $\xi = 500$, mais cela ne provient peut-être que de la non-concordance des résultats du modèle d'écoulement avec les données initiales (fig. 4). Sans qu'on ait besoin de faire d'extrapolation, ce graphique donne une bonne estimation des cotes d'arrêt qui ont une chance sur 1 000 d'être atteintes chaque année, soit 1 080 m et 1 110 m selon la valeur de ξ . La méthode permet donc bien de satisfaire l'objectif poursuivi.

VII ■ CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

● VII.1 Conclusion

On a explicité dans cet article une méthodologie d'obtention des cotes d'arrêt des événements avalancheux correspondant à des probabilités de dépassement données. Comme cette variable géométrique dépend à la fois de la dynamique du phénomène et du profil en long, il n'est en effet pas possible de caler une loi statistique théorique sur les cotes d'arrêt mesurées lors des événements du passé ; l'idée d'extrapoler vers les fréquences rares une telle loi doit donc être abandonnée au moins dans le contexte des Alpes du Nord. La méthode proposée consiste dans un premier temps à caler un modèle déterministe de propagation sur les données de terrain existantes (cotes de départ et d'arrêt, hauteurs d'écoulement). Le modèle choisi traite le déplacement d'un solide indéformable sur une pente ; il a deux paramètres dynamiques. Sous diverses variantes, ce modèle est très utilisé dans la communauté scientifique, ce qui permet de connaître des ordres de grandeur de ses paramètres. Dans un deuxième temps, on réduit la variabilité du problème de façon à pouvoir le modéliser. Il nous a fallu pour cela fixer la valeur d'un des deux paramètres dynamiques et laisser l'autre représenter la nature aléatoire du comportement dynamique d'une avalanche en écoulement. L'autre source de variabilité est la hauteur d'écoulement qui est bien traduite par une loi de Gumbel dans le cas du couloir des Favrandes. On a proposé de traduire la variabilité du paramètre dynamique par la somme de deux lois bêta. On peut ensuite, dans un troisième temps, simuler des échantillons des hauteurs d'écoulement et du paramètre dynamique pour autant d'événements fictifs que l'on veut, puis en déduire avec le modèle d'écoulement les cotes d'arrêt correspondantes. Finalement, cet échantillon des cotes d'arrêt permet d'obtenir une distribution statistique empirique dont la taille est suffisante pour que les quantiles de probabilité de dépassement faible soient interpolés et non extrapolés comme on aurait été obligé de le faire avec les cotes d'arrêt originales. Cette méthode ne permet de prédéterminer la cote d'arrêt de probabilité donnée que sur un profil en long ; tout un travail complémentaire est ensuite à faire pour traduire à deux dimensions, donc en zonage, l'information ponctuelle ainsi obtenue.

● VII.2 Perspectives et approfondissements

La mise au point de cette méthode en est à ses débuts ; il va maintenant falloir l'appliquer un grand nombre de fois pour en connaître les difficultés d'application. Une étude régionale donnera des indications sur l'adéquation de la somme de deux

lois bêta pour représenter les valeurs de μ , permettra d'interpréter physiquement l'existence de deux pointes dans leur histogramme et donnera des valeurs repères pour les autres couloirs. Ce complément est un préalable indispensable à l'utilisation de ces résultats pour des couloirs dépourvus de données historiques. Au-delà de la sécurisation et de l'utilisation régionale de la méthode, il sera intéressant de confronter ses résultats avec les méthodes régionales de type statistique, et voir si les deux approches sont convergentes : jusqu'ici, les approches statistiques utilisent seulement les avalanches extrêmes et présupposent l'homogénéité régionale. Dans les régions contrastées, il serait bon de vérifier cette homogénéité, et la méthode proposée ici, basée sur l'analyse déterministe de toutes les avalanches de chaque couloir, peut donner les critères permettant de le faire.

Lorsqu'on n'a pas de données de hauteurs d'écoulement (ou de volumes d'avalanches), la méthode reste identique en traitant statistiquement un seul paramètre : le paramètre dynamique. On peut alors se passer d'utiliser la méthode de Monte Carlo. Cela simplifie le problème, mais cela le réduit aussi beaucoup car toute la variabilité du phénomène avalancheux, qu'elle provienne de la météorologie (hauteur et/ou volume de neige) ou de la dynamique (type de neige en écoulement, effet de l'érosion du manteau neigeux et de la reprise, effet de la forme du couloir) n'est traduite que par la loi statistique du paramètre dynamique. Or, on a souvent constaté que les phénomènes catastrophiques proviennent de deux éléments importants qui se produisent simultanément ; et c'est exactement cette possibilité de concordance que l'étude par simulation permet d'étudier lorsqu'on a au moins deux facteurs aléatoires qui interviennent. Il serait donc souhaitable que la méthode proposée soit le plus possible traitée avec au moins deux facteurs, la hauteur d'écoulement (ou un équivalent, le volume) et au moins un paramètre dynamique. Dans le contexte français, les données de hauteurs d'écoulement (ou de volumes d'avalanche) sont plus difficiles à trouver que les données de cotes d'arrêt. Une étude régionale de ces données serait donc d'autant plus nécessaire pour que les chargés d'études aient quelques éléments leur permettant soit de caler une loi statistique sur ces données, soit de l'inférer par analogie avec des couloirs où ces informations sont connues. Une autre possibilité consiste à les obtenir par une étude nivo-météorologique.

Si la mise au point de la méthode est faite ici avec le modèle de mouvement d'un solide indéformable comme modèle dynamique, il va de soi que la méthodologie est également applicable avec un modèle issu de la mécanique des fluides, avec les équations de St Venant pour base. Une confrontation des résultats obtenus avec ces deux types de modèles serait fructueuse. Mais, au delà de cet apport, il faut insister sur le progrès très important que ferait réaliser la connaissance de valeurs chiffrées de grandeurs autres que la cote d'arrêt, et notamment la vitesse. La méthode mise au point ne renseigne en effet que sur la variable utilisée pour caler le modèle, c'est-à-dire la cote d'arrêt ; elle ne dit rien sur les autres variables du phénomène, alors que la vitesse est un paramètre fondamental pour les études de protection. Il nous faut donc souhaiter en conclusion que ce type de mesures de terrain seront possibles dans quelques années et qu'elles seront entreprises. Lorsque des données de vitesses seront connues en nombre suffisant, il faudra reprendre la formulation de la méthode puisqu'on pourra caler en même temps les deux paramètres dynamiques du modèle d'écoulement.

ment. La méthodologie sera ainsi plus riche et plus complète. Mais les difficultés de mise en œuvre seront alors plus importantes puisqu'on sera obligé de traiter un problème multi-dimensionnel. Il serait d'ailleurs aussi souhaitable d'étudier le problème avec une méthodologie théorique plus complète, intégrant dès le départ les incertitudes liées à chaque variable et les possibilités multiples de modélisation à chaque étape de la méthode. En adoptant enfin une perspective bayésienne [27], on obtiendrait alors une modélisation globale de notre problème très riche de possibilités.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été conduite dans le cadre d'un financement européen du 5^e PCRD 1998-2002, projet CADZIE n° EVG1-1999-00009. Nous remercions également Rémi Ducret qui a effectué le traitement des données nécessaire au bon déroulement de l'étude.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] HARBITZ C.B., Ed. (1998). — A survey of computational models for snow avalanche motion. SAME Project. 4^e European Framework Programme. Environment and Climate. Contract ENV4-CT96-0258. Deliverable n° 4, 130 pages.
- [2] GUBLER H. (1989). — Comparison of three models of avalanche dynamics. *Annals of Glaciology*, 13, pp. 82-89.
- [3] BARBOLINI M., GRUBER U., KEYLOCK C.J., NAAIM M., SAVI F. (2000). — Application of statistical and hydraulic-continuum dense snow avalanche models to five real European sites. *Cold Regions Science and Technology*, 31, pp. 133-149.
- [4] BUSER O., FRUTIGER H. (1980). — Observed maximum run-out distance of snow avalanches and the determination of the friction coefficients μ and ξ . *Journal of Glaciology*, vol. 26, n° 94, pp. 121-130.
- [5] BAKKEHOI S., CHENG T., DOMAAS U., LIED K., PERLA R., SCHIELDROP B. (1981). — On the computation of parameters that model snow avalanche motion. *Can Geotech. J.*, 18, 121, pp. 1-10.
- [6] MARTINELLI M. JR., LANG T.E., MEARS A.I. (1980). — Calculations of avalanche friction coefficients from field data. *Journal of Glaciology*, vol. 26, n° 94, pp. 109-119.
- [7] SALM B., BURKARD A., GUBLER H.U. (1990). — Calcul des avalanches : une méthode pour le praticien avec des exemples. IFENA Document n° 47. Traduction de l'allemand par Ancey C. Cemagref, 1993, 38 pages.
- [8] LIED K., BAKKEHOI S. (1980). — Empirical calculation of snow avalanche run-out distance based on topographic parameters. *Journal of Glaciology*, vol. 26, n° 94, pp. 165-177.
- [9] McCLUNG D.M., LIED K. (1987). — Statistical and geometrical definition of snow avalanche runout. *Cold Regions Science and Technology*, 13, pp. 107-119.
- [10] LIED K., TOPPE R. (1989). — Calculation of maximum snow avalanche run-out distance by use of digital terrain models. *Annals of Glaciology*, 13, pp. 164-169.
- [11] FUJIZAWA K., TSUNAKI R., KAMISHI I. (1993). — Estimating snow avalanche run-out distances from topographic data. *Annals of Glaciology*, 18, pp. 239-244.
- [12] ADJEL G. (1995). — Méthodes statistiques pour la détermination de la distance d'arrêt maximale des avalanches. *La Houille Blanche*, n° 7, pp. 100-104.
- [13] McCLUNG D.M., MEARS A.I. (1991). — Extreme value prediction of snow avalanche run-out. *Cold Regions Science and Technology*, 19, pp. 163-175.
- [14] McCLUNG D.M. (2000). — Extreme avalanche run-out in space and time. *Can. Geotech.*, 37, pp. 161-170.
- [15] ANCEY C., MEUNIER M., CHARLIER C. (1999). — Utilisation d'outils statistiques dans la détermination des scénarios de l'avalanche de référence et l'aide à la décision. Table ronde Avalanche Control in Europe. Breuil Cervina, 19-20 avril 99, pp. 35-45.
- [16] KEYLOCK C.J., McCLUNG D.M., MAGNUSON M.M. (1999). — Avalanche risk mapping by simulation. *Journal of Glaciology*, vol. 45, n° 150, pp. 303-314.
- [17] ANCEY C., RICHARD D. (2001). — Détermination de l'aléa de référence. Convention DPPR n° 11/2000. Rapport final. Cemagref Météo-France CEN, 176 pages.
- [18] STRAZZERI D., MANCHE Y., 1998. — L'Enquête Permanente sur les Avalanches. *Revue de Géographie Alpine*, n° 2, pp. 45-52.
- [19] BRUGNOT G., POCAT R. (1981). — Numerical simulation of avalanches. *Journal of Glaciology*, vol. 27, n° 95, pp. 77-88.
- [20] ANCEY C. (1994). — Modélisation des avalanches denses. Approches théorique et numérique. *La Houille Blanche* n° 5/6-1994, pp. 25-39.
- [21] LANG T.E., DAWSON K.L., MARTINELLI M. JR. (1979). — Application of numerical transient fluid dynamics to snow avalanche flow. Part I. Development of computer program AVALNCH. *Journal of Glaciology*, vol. 22, n° 86, 107-115.
- [22] NAAIM M., ANCEY C. (1992). — Modélisation of dense avalanches. Université européenne d'été sur les risques naturels. Neige et avalanches. Chamonix 14-25/09/92, pp. 173-181.
- [23] RAPIN F. (2000). — Etude du risque d'avalanche. Projet de Centre de secours principal près des Pèlerins. Commune de Chamonix-Mont-Blanc (74). Cemagref. 33 pages + annexes.
- [24] LANG M. (1995). — Les chroniques en hydrologie. Thèse de l'Université Joseph Fourier. Grenoble France. Cemagref Lyon, 296 pages.
- [25] PERLA R., CHENG T.T., McCLUNG D.M. (1980). — A two-parameter model of snow avalanche motion. *Journal of Glaciology*, vol. 26, n° 94, pp. 197-207.
- [26] LANG T.E., NAKAMURA T., DENT J.D., MARTINELLI M. JR. (1985). — Avalanche flow dynamics with material locking. *Annals of Glaciology*, 6, pp. 5-8.
- [27] BERNIER J., PARENT E., BOREUX J.J. (2000). — Statistique pour l'environnement. Traitement bayésien de l'incertitude. Editions TEC&DOC, 363 pages.