

Coulées de boue et avalanches virtuelles : un outil visuel de communication et de caractérisation pour les risques naturels en montagne

Dominique Laigle^a, Mohamed Naaim^a, Pierre Saramito^b, Fabrice Neyret^c, Marie-Paule Cani^c

La prévention des risques naturels en montagne, des avalanches aux coulées de boue, passe par des simulations numériques de plus en plus poussées. Ces dernières mettent en œuvre des lois de comportement de matériaux complexes, comme les fluides à seuil ou les écoulements granulaires, ainsi que des méthodes numériques délicates : volumes finis dans un cadre dynamique, solveurs de Riemann, maillages adaptatifs, etc. Ces simulations débouchent, souvent au bout de plusieurs heures voire de plusieurs jours de calcul, sur d'importants volumes de données : flots de matière, vitesse et pression en tout point d'une grille tri-dimensionnelle, et ce, au cours du temps.

La dernière étape du processus, qui n'est pas forcément la plus facile, consiste à communiquer de tels résultats au public, ou aux politiques. On peut d'ailleurs considérer que la communication autour des risques naturels est depuis longtemps un point délicat qui peut *in fine* revêtir une importance capitale si elle détermine une prise de décision judicieuse. Considérant que les outils d'aide à la décision en matière de risques naturels en montagne sont encore d'une accessibilité trop limitée pour les non-initiés, nous avons initié un projet dont la finalité est de tirer parti de la génération d'images virtuelles, appliquée à la simulation graphique des risques, afin d'améliorer le niveau de communication possible, notamment avec les élus. Le présent travail a donc pour finalité de conduire à des technologies innovantes de communication et de gestion des risques naturels en montagne et à ce titre, il est destiné à être diffusé auprès d'un large public. S'appuyant sur des modèles validés au laboratoire et au terrain, il pourra être très utile aux gestionnaires de terrain

comme les techniciens des services de restauration des terrains en montagne, ou aux responsables politiques confrontés à un problème d'aménagement de protection ou plus généralement de sécurité des biens et des personnes. Le rendu final de ce travail devrait permettre aux usagers et politiques de mieux prendre conscience des phénomènes mis en jeu (aléas), d'intégrer de façon réaliste la place des enjeux et donc de tenir compte de la vulnérabilité, et enfin d'intégrer l'influence des ouvrages de protection envisagés sur un site donné.

Le présent article a pour but de présenter les premiers résultats obtenus dans ce domaine, dans le cadre d'un projet regroupant des équipes du Cemagref de l'IMAG¹ et de l'INRIA² et qui a pour titre « Coulées de boue et avalanches virtuelles ». En pratique, le but de cette action est de développer un ensemble d'outils permettant d'aller de la simulation d'un risque naturel en montagne jusqu'à sa reproduction graphique visuellement réaliste. En complément d'un affichage bi-dimensionnel classique sous forme de cartes, les coulées de boue et les avalanches virtuelles résultant de calculs effectués grâce aux modèles d'écoulement de l'unité de recherche Érosion torrentielle, neige et avalanches du Cemagref de Grenoble pourront être visualisées sous forme de film, dans le studio de réalité virtuelle de l'INRIA Rhône-Alpes. L'animation sera alors accompagnée d'un rendu sonore spatialisé de la coulée, de manière à augmenter encore l'impression d'immersion du spectateur.

Après une rapide présentation des modèles mis en œuvre, nous détaillerons les travaux effectués pour dans un premier temps, mettre au point des structures de maillage de calcul « adaptatifs »

1. IMAG : Institut d'informatique et mathématiques appliquées de Grenoble.

2. INRIA : Institut national de recherche en informatique et en automatique.

Contact

a. Cemagref, UR Érosion torrentielle, neige et avalanches, 2 rue de la papeterie, BP76, 38402 Saint-Martin-d'Hères Cedex

b. IMAG, Laboratoire de modélisation et de calcul, BP53, 38041 Grenoble Cedex 9

c. IMAG/INRIA, Laboratoire graphisme, vision et robotique, INRIA ZIRST, 655, av. de l'Europe, 38330 Montbonnot-Saint-Martin

visant à rendre plus rapides et plus précis les modèles de calcul ; dans un deuxième temps, valider les modèles par confrontation à des événements réels ; et dans un troisième temps, mettre au point des outils d' « habillage » des coulées permettant un rendu visuel réaliste.

Présentation générale des modèles

Les modèles utilisés sont dédiés au calcul d'écoulements à surface libre non contraints latéralement de matériaux à rhéologie complexe. Ils sont fondés sur la forme classique des équations de Saint-Venant bidimensionnelles, dites à forte pente, qui sont résolues en utilisant une technique de volumes finis qui requiert dans un premier temps de mailler le domaine de calcul. Les équations sont résolues en tenant compte du comportement du matériau par l'intermédiaire d'une expression spécifique de la contrainte à la paroi et de la topographie du terrain par l'intermédiaire d'un modèle numérique de terrain.

Un hydrogramme peut être spécifié comme condition à la limite du domaine de calcul. Le modèle produit des valeurs de la hauteur et de la vitesse d'écoulement pour chaque cellule du maillage de calcul et pour chaque pas de temps du calcul.

Équations

Les modèles sont fondés sur la forme conservative des équations de Saint-Venant à forte pente bidimensionnelles (1) et (2). Ils prennent en compte l'effet de la gravité et des dissipations à l'intérieur du matériau en écoulement par l'intermédiaire d'une expression spécifique de la contrainte à la paroi.

Conservation de la masse :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

Conservation de la quantité de mouvement :

$$\begin{cases} \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial\left[h\delta\bar{u}^2 + \frac{gh^2 \cos(\theta_{xy})}{2}\right]}{\partial x} + \frac{\partial(h\delta\bar{u}\bar{v})}{\partial y} = g h \sin(\theta_x) - \frac{\bar{u}}{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}} \frac{\tau_p}{\rho} \\ \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(h\delta\bar{u}\bar{v})}{\partial x} + \frac{\partial\left[h\delta\bar{v}^2 + \frac{gh^2 \cos(\theta_{xy})}{2}\right]}{\partial y} = g h \sin(\theta_y) - \frac{\bar{v}}{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}} \frac{\tau_p}{\rho} \end{cases} \quad (2)$$

Pour les laves torrentielles boueuses, une expression spécifique due à Coussot (1994) et basée sur l'hypothèse d'un comportement viscoplastique du matériau (modèle de Herschel-Bulkley) est utilisée (3). Ce type de modèle est valide uniquement pour des matériaux où la fraction fine est suffisamment importante pour lubrifier les contacts entre grains.

Expression de la contrainte à la paroi pour les laves torrentielles boueuses :

$$\frac{\tau_p}{\rho} = \tau_c \left[1 + 1.93 \left[\frac{\tau_c}{K} \left(\frac{h}{\sqrt{\bar{u}^2 + \bar{v}^2}} \right)^{1/3} \right]^{-0.9} \right] \quad (3)$$

Par conséquent, le modèle est théoriquement valide uniquement pour les coulées boueuses et les laves torrentielles à matrice boueuse avec une teneur en argile suffisamment élevée. Pour les avalanches denses, une loi de comportement de type Mohr-Coulomb est utilisée (4), assimilant ainsi le comportement de la neige dense et sèche à celui d'un milieu granulaire.

Expression de la contrainte à la paroi pour les avalanches denses :

$$\frac{\tau_p}{\rho} = \rho g h \cos(\theta_{xy}) \mu (\|\bar{u}\|, h) \quad (4)$$

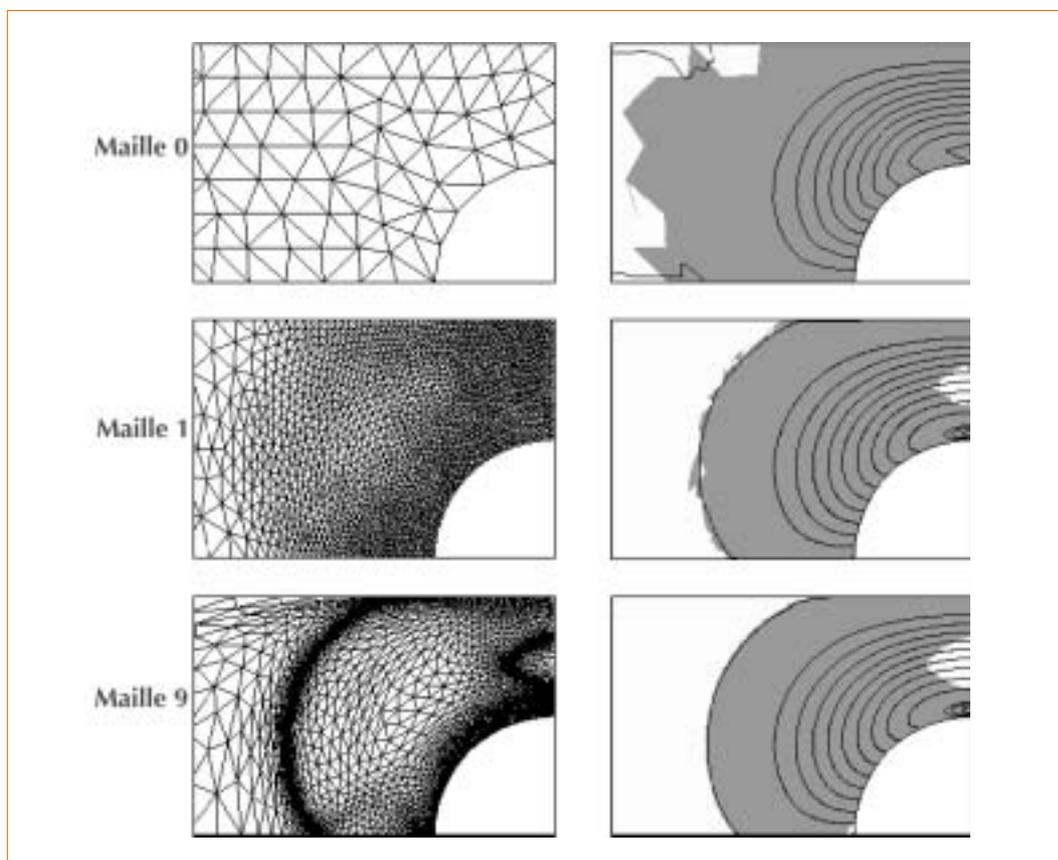
θ_x et θ_y sont les angles de pente et u et v les composantes de la vitesse le long de deux directions perpendiculaires : respectivement x et y , θ_{xy} est l'angle de plus grande pente. δ est un coefficient quadratique de correction du profil de vitesses. Dans le cas des laves torrentielles boueuses, τ_p est la contrainte à la paroi qui dépend du seuil de contrainte τ_c et de la consistance K du matériau. ρ est la masse volumique du matériau. Pour les avalanches denses, le paramètre essentiel est constitué d'un angle de frottement interne du matériau (μ est la tangente de cet angle).

Ces équations sont résolues en utilisant un schéma numérique de type Godunov, qui nécessite au préalable de définir une structure de maillage.

Maillages adaptatifs LMC et Cemagref

Les modèles d'écoulement d'avalanches denses et de laves torrentielles du Cemagref sont résolus par des techniques de volumes finis. Ces techniques font appel à des maillages de calcul bidimensionnels plaqués sur la surface d'écoulement : le terrain. Les modèles peuvent utiliser des maillages constitués au choix de triangles ou de quadrangles. Les maillages les plus simples et qui ont aussi été les plus utilisés à ce jour sont constitués de mailles carrées. Cependant, ce type de maillage n'est pas spécifiquement adapté à la topographie du terrain et notamment aux zones de topographie complexe. Pour obtenir une bonne précision des calculs avec des maillages à cellules carrées, il est souvent nécessaire de diminuer la taille des cellules afin qu'elles soient suffisamment petites dans les zones de topographie complexe. Cependant, ceci amène à augmenter le nombre de cellules, y compris dans

des zones où cela n'est pas nécessaire et par conséquent à augmenter, souvent de façon très importante les temps de calcul. Afin d'apporter une réponse pertinente à ce problème, l'IMAG, en collaboration avec le Cemagref, a travaillé à la génération de maillages de calcul adaptés à la topographie de terrain. Il s'agit de maillages surfaciques adaptés à l'aide d'une métrique anisotrope : les éléments, constitués de triangles ou de quadrangles peuvent être étirés dans une direction privilégiée. Ces maillages adaptatifs permettent un gain de précision lors de l'utilisation de modèles moyennés dans l'épaisseur tels que les modèles d'étalement d'avalanches denses et de laves torrentielles du Cemagref. En effet, grâce à cette technique, il est possible de raffiner le maillage, c'est-à-dire diminuer la taille des cellules mais aussi donner une orientation privilégiée à leurs facettes. Ceci permet un traitement particulièrement efficace des zones à forte pente, des zones de rupture de pente et de façon plus générale des zones de topographie complexe. Il est apparu que les maillages (figure 1) constitués de quadrangles sont plus précis que les maillages constitués de triangles pour la méthode numérique utilisée.



◀ Figure 1 – Exemple de maillage adapté en fonction des conditions locales d'écoulement.

Confrontation des simulations à des événements réels

L'objectif de la présente étude est de comparer les résultats de simulation numérique à des événements réels, essentiellement pour tester la capacité des modèles à représenter des événements réels, mais également pour déterminer leurs domaines de validité et niveau de précision. Une telle confrontation nécessitait des données très précises concernant les événements et préférentiellement une détermination indépendante des caractéristiques des matériaux en écoulement. La confrontation a porté essentiellement sur la forme globale de l'extension des coulées, que ce soit pour les laves torrentielles ou pour les avalanches et donc sur la surface couverte par les dépôts, mais aussi sur la distribution spatiale des hauteurs de dépôt.

Événement de lave torrentielle : le Wartschenbach (1997)

L'événement de référence utilisé s'est produit sur le torrent du Wartschenbach près de la ville de Lienz (Ost-Tyrol, Autriche) le 16 août 1997 après un intense épisode pluvieux avec de la grêle (40 mm de pluie en 20 minutes). Environ 45 000 m³ d'eau et de sédiments furent mobilisés en 30 minutes et atteignirent la plage de dépôt située à l'apex du cône de déjection. La moitié du matériau transporté s'arrêta à cet endroit. Les 20 000 à 25 000 m³ de matériau restant s'étalèrent sur le cône de déjection où ils endommagèrent 15 maisons (Hübl et Steinwendtner, 2000b). Un relevé topographique des limites d'étalement ainsi que des photos de ces dépôts étaient disponibles.

L'essentiel des données disponibles ne peut être utilisé directement pour générer les données d'entrée du modèle, mais nécessite un traitement préalable. Le travail effectué dans le cadre de la présente étude peut être séparé en deux parties : la détermination des données d'entrée du modèle et la confrontation entre résultats de simulation et descriptions des événements réels. Concernant la détermination des données d'entrée, un point essentiel est l'estimation des valeurs des paramètres rhéologiques. Pour l'événement du Wartschenbach, des analyses des propriétés du matériau avaient été menées préalablement à la présente étude en utilisant par exemple un tapis roulant (Hübl et Steinwendtner, 2000a). Toutefois, les valeurs de seuil de contrainte déduites de cette

analyse (environ 100 Pa) ne pouvaient expliquer les épaisseurs de dépôt observées sur le terrain.

DÉTERMINATION DES PARAMÈTRES D'ENTRÉE

Propriétés du matériau

Les valeurs des paramètres rhéologiques déduites d'investigations directes, en utilisant par exemple le tapis roulant décrit par Hübl et Steinwendtner (2000a) et effectuées sur des échantillons frais, n'étaient pas parfaitement satisfaisantes, essentiellement parce qu'elles ne permettaient pas d'expliquer l'épaisseur des dépôts observés au terrain. Par conséquent, il fut décidé d'exploiter une série de photographies prises juste après l'événement pour en déduire la valeur du seuil de contrainte (en pratique, le rapport τ_c/ρ). En pratique, nous disposions d'une photographie d'un dépôt appuyé contre le mur d'une scierie et dont nous avons pu estimer l'épaisseur. Nous disposions également d'une estimation de la pente à cet endroit. Il fut donc possible, grâce à la formule classique $\tau_c/\rho = g \sin \theta$, de déduire une valeur du rapport τ_c/ρ comprise entre 0,8 et 1,35. En pratique et *a priori*, nous avons retenu une valeur égale à 1,1 pour la première simulation. Conformément à Cousot *et al.* (1998), le rapport K/τ_c a été supposé égal à 0,3.

Hydrogramme d'entrée

L'hydrogramme d'entrée que nous avons considéré est de forme triangulaire et présente un débit de pointe de 16 m³/s et un volume de 22 500 m³.

Modèle numérique de terrain

Plusieurs grilles constituées de cellules carrées de 5 m ou 2 m de côté (générées avec ou sans l'utilisation de « break-lines ») étaient disponibles suite à une préalable application du modèle d'hydraulique des coulées boueuses FLO2D (O'Brien et Julien, 1993). Les premières simulations ont été effectuées avec des tailles de cellules de 2 m, tandis que des tailles de cellules de 5 m ont été utilisées dans le cadre de l'analyse de sensibilité du modèle.

Zones imperméables

Les bâtiments présents dans la zone d'étalement ont été pris en compte comme des groupes de cellules aux bords imperméables. Une zone boisée centrale qui n'a pas été affectée par l'écoulement réel a également été traitée comme une zone imperméable.

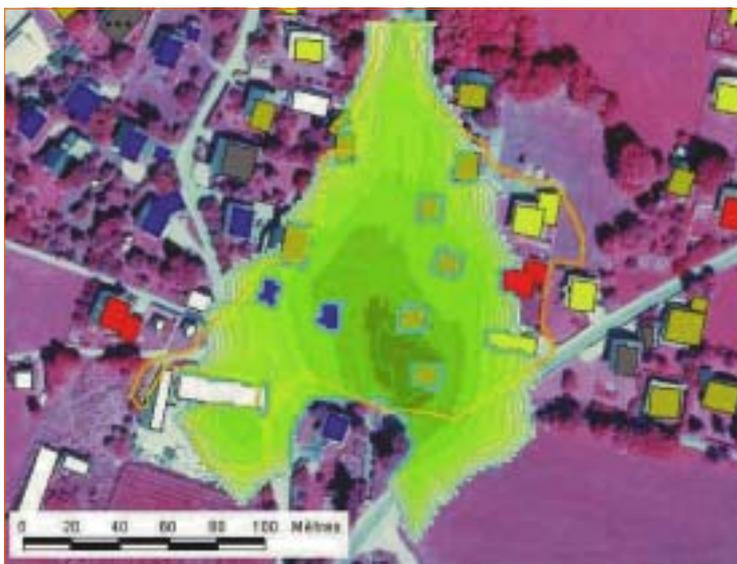
RÉSULTAT DE SIMULATION ET CONFRONTATION À L'ÉVÉNEMENT RÉEL

La forme globale de l'extension des dépôts (figure 2) est assez satisfaisante. De plus, les hauteurs simulées sont cohérentes avec la réalité. Par conséquent, notre estimation des valeurs des paramètres rhéologiques peut être considérée comme valide. Toutefois, dans la partie est de la zone d'étalement, la simulation ne rend pas complètement compte de la réalité. Ainsi, quatre maisons sont affectées par l'écoulement réel alors qu'elles ne le sont pas par l'écoulement simulé. Il y a également un dépassement de la route à la partie sud-est de l'étalement qui est simulé mais non observé dans la réalité. Ce point toutefois n'est pas aussi problématique que le précédent. En effet, même si la simulation ne rend pas parfaitement compte de la limite du dépôt observé, on peut voir sur les photographies prises après l'événement, que très probablement la lave torrentielle réelle a partiellement dépassé la route sans qu'il soit possible de déterminer précisément la limite atteinte par celle-ci. La surface couverte par le dépôt simulé est légèrement plus grande que celle du dépôt réel mais dans un rapport qui reste faible. Ainsi le rapport surface couverte simulée sur surface couverte réelles s'établit à 112 %.

En référence à la figure 3, la sensibilité du modèle aux variations du rapport τ_c/ρ paraît bien plus importante que celle résultant des variations du rapport K/τ_c . Une variation de 10 % de la valeur de τ_c/ρ se traduit par une variation de 6,5 % de la superficie des dépôts (tableau 1), tandis qu'une variation de 1/3 du rapport K/τ_c se traduit par de



▲ Figure 3 – Sensibilité du résultat par rapport aux variations des propriétés du matériau (variation de + ou - 30 % du rapport τ_c/ρ , en jaune).



faibles variations. Cependant, d'autres cas d'études ont permis d'établir que l'influence relative des paramètres n'est pas la même pour tous les événements, même si généralement le rapport τ_c/ρ semble être le paramètre dominant.

▲ Figure 2 – Confrontation des extensions mesurées et calculées d'une lave torrentielle (Wartschenbach, Autriche).

Valeur de τ_c/ρ	0,8	0,9	1,0	1,1
Superficie couverte par les dépôts (0,01 km ²)	1,76	1,71	1,60	1,50

▲ Tableau 1 – Influence de la valeur de τ_c/ρ sur la superficie couverte par les dépôts.

Événement avalancheux : Taconnaz 1999

TRAITEMENT DU RISQUE D'AVALANCHE : ZONAGE ET PROTECTION

Le zonage du risque et les techniques de protection sont des outils complémentaires pour gérer le risque et protéger les biens, les personnes et leurs activités dans les zones de montagne soumises aux risques d'avalanches. La connaissance scientifique dans le domaine des effets hydrauliques des ouvrages de protection sur les écoulements avalancheux est relativement limitée et continue à mobiliser la communauté scientifique. Pourtant, tant en France qu'en Europe, les ingénieurs ont eu recours à de nombreuses occasions aux ouvrages de protection dits passifs, pour dissiper l'énergie, contenir, dévier ou arrêter les avalanches. La conception de ces structures de défense est faite à partir de connaissances empiriques souvent

issue de domaines voisins tels que l'hydraulique. Si l'analogie avec des écoulements d'eau est possible pour des écoulements fortement inertiels (grand nombre de Froude), il n'en est pas de même dans les phases de ralentissement et d'arrêt. Dans ces phases, la dissipation d'énergie et les dépôts sont fortement liés au comportement du fluide qui devient dominant.

Le coût des expérimentations *in situ*, le danger et les difficultés relatives au milieu montagneux, et le faible nombre annuel d'avalanches sont les raisons principales qui ont conduit les chercheurs à privilégier les études :

- en laboratoire sur modèle réduit et utilisant des fluides modèles ;
- les simulations numériques fines.

DISPOSITIF DE TACONNAZ

L'objectif de cette partie est de présenter l'application du modèle développé dans Naaim *et al.* (2003) à l'événement avalanché de 1999 qui a interagi avec le dispositif de protection de Tacconnaz (Haute-Savoie). Avant et après l'événement, un relevé topographique de la surface de la zone d'arrêt a été réalisé. La localisation des dépôts ainsi que leur volumes ont été ainsi finement cartographiés à l'intérieur du dispositif.

Le dispositif de protection de Tacconnaz a été construit en 1991 dans l'objectif de protéger les habitations contre les avalanches denses qui, par de nombreuses fois dans le passé, ont atteint le village. Il a été conçu en combinant les effets de trois types de structures. À la sortie de la zone d'écoulement, l'avalanche rencontre d'abord 11 grandes lames déflectrices construites en béton (fortement ferrailé). Compte tenu du caractère inertiel de l'écoulement dans cette zone, les effets attendus de ces ouvrages sont d'étaler l'avalanche et de dissiper une partie de son énergie. À l'aval de ces structures, une série de tas freineurs a été édifiée. L'objectif est de perturber l'écoulement en le faisant divaguer pour consommer le maximum du reste de son énergie. Une digue latérale a été rajoutée au dispositif pour contenir l'écoulement sur son flanc droit et l'empêcher de s'étaler trop vers la station de sport d'hiver. Ce dispositif est terminé par une digue frontale de grande taille destinée à arrêter définitivement l'avalanche dense. Ce dispositif a été conçu pour contenir jusqu'à $7,10^5 \text{ m}^3$.

AVALANCHE DE 1999 : DONNÉES RECUEILLIES

Durant le sévère hiver de 1999, une grande avalanche mixte s'est déclenchée sur le glacier de Tacconnaz et a mobilisé pas moins de $8,5 \cdot 10^5 \text{ m}^3$ de neige fraîche et sèche. Elle a aussi incorporé une grande quantité de glace. La partie dense a été globalement stoppée par le dispositif. Quant à la partie poudreuse, elle a continué sa trajectoire et traversé le village sans provoquer de dégâts notables.

Le volume mobilisé par la partie poudreuse a été estimé à $5,10^4 \text{ m}^3$. L'essentiel de la partie dense de cette avalanche a été stoppé excepté un débordement au niveau de la digue latérale et un débordement au niveau de la digue frontale.

Un survol aérien a permis de prendre des photos qui ont été utilisées pour réaliser une topographie précise du dépôt (grille de résolution 5 m).

Une série de visites de terrain a permis :

- de localiser la zone de départ ;
- de déterminer le volume des débordements.

HYDROGRAMME À L'ENTRÉE DU DISPOSITIF

Grâce à un modèle numérique de terrain, la simulation de l'événement a été réalisée par le modèle bi-couches décrit dans Naaim (1998). L'objectif visé était de quantifier l'hydrogramme de la phase dense à l'entrée du dispositif de protection. La valeur du coefficient de frottement a été prise égale à celle d'une neige fraîche et sèche, et le modèle d'érosion a été calibré de façon à ce que le volume total de l'avalanche dense entrant dans le dispositif de protection soit égale à $7,5 \cdot 10^5 \text{ m}^3$.

SIMULATION ET RÉSULTAT DE L'ÉCOULEMENT À L'INTÉRIEUR DU DISPOSITIF DE PROTECTION

Une seconde simulation a été entreprise pour étudier l'écoulement à l'intérieur du dispositif. Nous avons utilisé une représentation du terrain très précise (pas d'espace = 1 m) (même paramètre de frottement que la simulation globale). Les tas freineurs et les digues ont été correctement représentés dans ce modèle numérique de terrain. Les lames déflectrices (de dimension métrique) ont été traitées comme des parois imperméables.

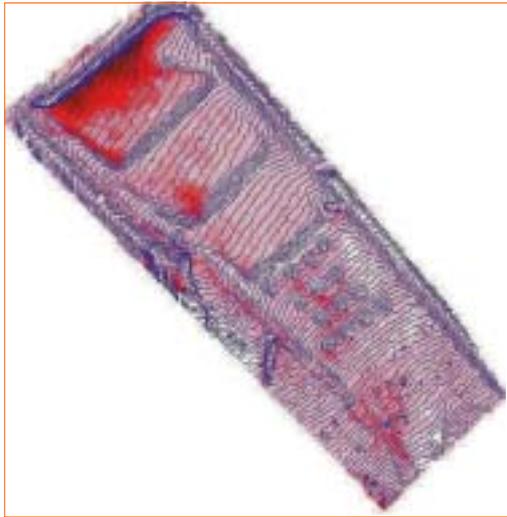
Le modèle développé dans Naaim *et al.* (2003) a ensuite été appliqué et les résultats de la simulation ont été analysés sur trois points : les caractéristiques globales de l'écoulement, la structure du dépôt, et la localisation des débordements ainsi que leurs volumes.

La structure du dépôt à l'intérieur du dispositif a été comparée aux mesures de terrain (figure 4). Le modèle a permis de retrouver globalement la distribution observée. Les débordements simulés (figure 5) tant latéralement que frontalement correspondaient assez bien à ceux observés. Malgré la complexité du dispositif et la simplicité du modèle utilisé, le résultat est très encourageant.

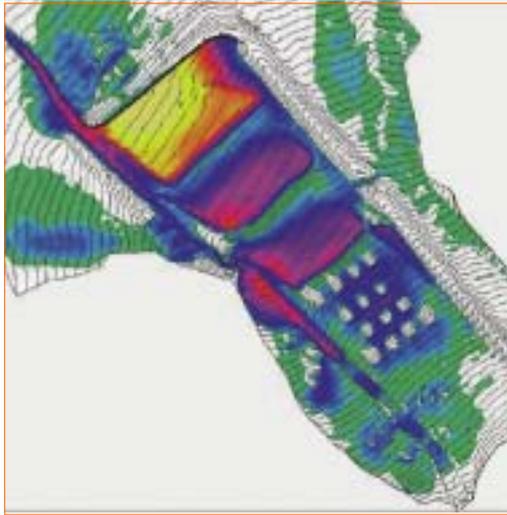
Recherche d'un rendu réaliste des phénomènes

L'INRIA s'est intéressé dans un premier temps à la représentation réaliste des avalanches denses qui est à ce jour la plus avancée, puis aux coulées boueuses. La particularité des avalanches denses est de présenter une surface granuleuse car constituée généralement de boules de neige. Afin de représenter ce type de texture, deux méthodes ont été testées : (i) rendu de particules à l'aide d'une texture transparente contenant un disque flou, avec calcul des ombres portées (figure 6) ; (ii) rendu d'une surface semi-transparente lissée, reconstruite à partir des particules (figure 8, p. 134). Le meilleur résultat en termes de réalisme est obtenu par association des deux méthodes : le caractère discret des particules reproduit la texture granuleuse que l'on observe dans la réalité, tandis que l'utilisation d'une surface homogénéisée l'échantillonnage. Il est d'ailleurs important de noter qu'une surface interpolée opaque permet une bonne traduction de la texture de surface des coulées boueuses. Cela est particulièrement net sur la figure 7 (p. 134) qui représente une lave torrentielle sur un cône de déjection et qui, bien que la couleur ne soit pas respectée, est assez représentative de l'apparence d'une coulée boueuse.

L'une des difficultés rencontrées pour l'obtention d'un rendu réaliste de l'habillage est le caractère moyen des valeurs des variables, notamment la vitesse, fournies par les modèles de simulation. En effet, l'utilisation d'équations de type Saint-Venant ne donne accès qu'à des valeurs moyennes de la vitesse sur la hauteur d'écoulement et pas directement à la vitesse de surface. De plus, cette surface présente une agitation importante avec notamment la projection de boules de neige. Ce problème a été partiellement résolu en ajoutant artificiellement une dynamique propre aux particules de rendu surfacique. Cette dynamique propre est calculée en utilisant les lois de la mécanique du point.



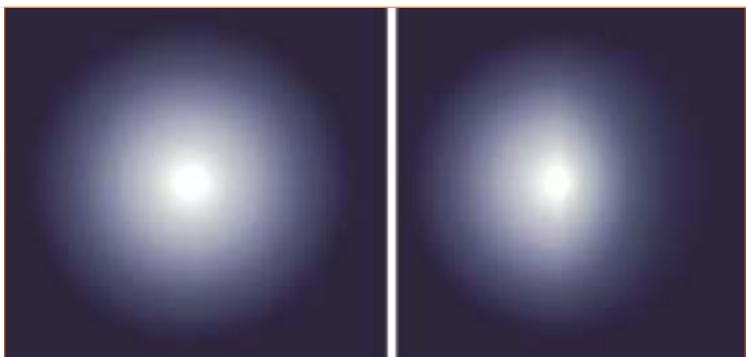
◀ Figure 4 – Topographie du paravalanche de Tacconnaz et dépôt mesuré.



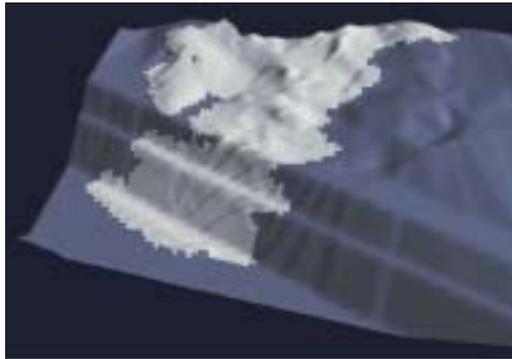
◀ Figure 5 – Simulation du paravalanche de Tacconnaz, dépôt calculé.

Bien que travaillant globalement à l'amélioration du rendu visuel, le laboratoire GRAVIR s'est plus particulièrement penché sur un problème spécifique qui est le rendu du front d'écoulement.

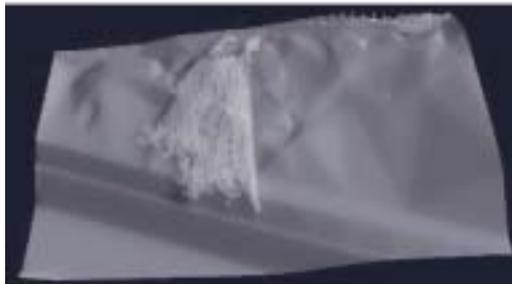
▼ Figure 6 – Éléments d'animation pour les avalanches denses : à gauche, « billboard » ; à droite, avec effet d'ombrage.



► Figure 7 – Texture lissée pour les coulées de boue, image 6.



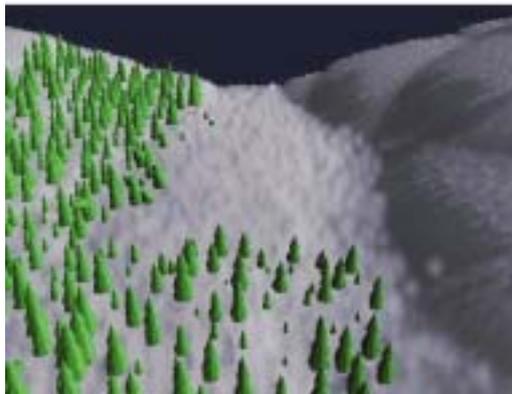
► Figure 8 – Texture particulière pour une avalanche.



► Figure 9 – Traitement du front d'écoulement.



► Figure 10 – Ajout d'éléments de complexification de la coulée (arbres cassés et emportés).



Ce rendu pose en effet un problème particulier car la finesse des résultats fournis par les modèles de simulation dépend directement de la finesse des maillages de calcul utilisés. Ainsi, il n'est pas

possible grâce à ces modèles de représenter précisément la courbure du front et *a fortiori* le mouvement spécifique des particules dans cette zone, ce qui n'autorise pas directement un rendu réaliste de l'écoulement à ce niveau. Un travail spécifique est donc en cours qui a permis d'obtenir des résultats partiels assez satisfaisants (figure 9).

Enfin, l'INRIA a introduit la prise en compte d'éléments animés secondaires du décor en interaction avec la coulée, en l'occurrence l'arrachement et le transport d'obstacles (arbres, figure 10) afin d'améliorer encore le côté réaliste des représentations graphiques.

Conclusion

Le présent article fait état de l'avancement du projet « coulées de boue et avalanches virtuelles » au sein duquel coopèrent le Cemagref, l'INRIA et l'IMAG. À ce jour, les coulées de boue et les avalanches denses sont en passe d'être correctement traitées : les calculs par des modèles moyennés dans l'épaisseur sont qualitativement et quantitativement concordants avec les observations de terrain. Les structures de maillages de calcul ont été optimisées. Le rendu visuellement réaliste des avalanches denses, même s'il nécessite encore des améliorations, est assez avancé, alors que celui des coulées de boue reste à améliorer de façon plus nette. L'application sur un cas de terrain de la totalité de la méthodologie a été partiellement menée (application au cône de déjection du torrent du Pousset en Maurienne), mais ce point reste à finaliser par application à d'autres sites tels que celui de Tacconnaz qui est en cours de traitement. L'essentiel du travail restant à accomplir concerne la pertinence du rendu visuel pour lequel les outils de base sont maintenant développés, mais qui nécessite encore une finalisation. Ainsi, la phase de discussion entre le Cemagref et l'INRIA concernant la pertinence des rendus visuels reste à mener afin d'en optimiser le caractère réaliste. Cette phase, d'une grande importance pratique, s'appuiera sur un certain nombre de cas bien documentés et représentatifs des différents phénomènes modélisés. Le rendu proposé par l'INRIA sera alors « expertisé » par le Cemagref afin de faire ressortir les points à améliorer et mettre au point une stratégie permettant d'apporter techniquement les améliorations souhaitées, selon une démarche d'analyse en retour systématique.

Le présent travail a pour finalité de conduire à des technologies innovantes de communication et de gestion des risques naturels en montagne. S'appuyant sur des modèles validés au laboratoire et au terrain, il pourra être très utile aux gestionnaires de terrain ou aux responsables politiques confrontés à un problème d'aménagement de protection ou plus généralement de sécurité des biens et des personnes. Le rendu final de ce travail intégrant différents niveaux de diffusion multi-

média, permettra aux usagers et politiques de mieux prendre conscience des phénomènes mis en jeu (aléas), d'intégrer de façon réaliste la place des enjeux et donc de tenir compte de la vulnérabilité, et enfin d'intégrer l'influence des ouvrages de protection envisagés sur un site donné. À ce titre, on peut considérer qu'à terme ce type d'outil deviendra déterminant pour la prise de décision dans le domaine des risques naturels en montagne. □

Résumé

La prévention des risques naturels en montagne, des avalanches aux coulées de boue, passe par des simulations numériques de plus en plus poussées. Ces dernières mettent en œuvre des lois de comportement de matériaux complexes, comme les fluides à seuil ou les écoulements granulaires, ainsi que des méthodes numériques délicates. Ces simulations débouchent, souvent au bout de plusieurs heures voire de plusieurs jours de calcul, sur d'importants volumes de données. La dernière étape du processus consiste à communiquer de tels résultats au public ou aux politiques. Considérant que les outils d'aide à la décision en matière de risques naturels en montagne sont encore d'une accessibilité trop limitée pour les non-initiés, nous avons initié un projet dont la finalité est de tirer parti de la génération d'images virtuelles, afin d'améliorer le niveau de communication possible des outils de simulation existants. En pratique, le but de cette action est de développer un ensemble d'outils permettant d'aller de la simulation d'un risque naturel en montagne jusqu'à sa reproduction graphique visuellement réaliste. Après une rapide présentation des modèles mis en œuvre, nous détaillons les travaux effectués pour dans un premier temps mettre au point des structures de maillage de calcul « adaptatifs » visant à rendre plus rapides et plus précis les modèles de calcul, dans un deuxième temps valider les modèles par confrontation à des événements réels, et dans un troisième temps mettre au point des outils d'« habillage » des coulées permettant un rendu visuel réaliste.

Abstract

The prevention of natural risks in mountainous areas: snow avalanches and debris-flows, requires more and more complex numerical simulations. These require to take into account the behaviour of complex materials as well as delicate numerical methods. These simulations provide after several hours or days of computation large quantities of data. The last step of the process is to communicate such results to the public and people in charge of political decisions. Considering the tools of decision making in the framework of natural risks in mountainous areas is still hardly accessible to non-specialists, we have initiated a research project whose goal is to use the generation of synthetic images to improve the level of possible communication of existing numerical tools. In practice, the goal of this research is to develop a series of tools making possible to go through from the simulation of natural risks to their graphically realistic representation. After a short presentation of numerical models, we present in details the work carried out to improve the structure of computation mesh according to the topography in order to make computations faster and more accurate, to validate models in the field by comparison to real events and to build a graphically realistic representation of the flows.

Bibliographie

COUSSOT, P., 1994, Steady, laminar, flow of concentrated mud suspensions in open channel, *Journal of Hydraulic Research*, vol. 32, n°4.

COUSSOT, P., LAIGLE, D., ARATTANO, M., DEGANUTTI, A., MARCHI, L., 1998, Direct determination of rheological characteristics of debris flow, *Journal of hydraulic engineering*, n°8, August 1998, p. 864-868.

HÜBL, J., STEINWENDTNER, H., 2000a, Estimation of rheological properties of viscous debris flows using a belt conveyor, *Phys. Chem. Earth (B)*, vol. 25, n°9, p. 751-755.

HÜBL, J., STEINWENDTNER, H., 2000b, Zweidimensionale Modellierung von Murgängen anhand zweier ausgewählter Beispiele in Österreich, *Internationales Symposium, Interpraevent 2000, Villach/Österreich, Tagungspublikation, Band 3*, p. 179-190 (en Allemand).

NAAIM, M., 1998, *Étude des processus physiques et modélisation des écoulements du transport de la neige et des avalanches*, thèse d'habilitation à diriger les recherches de l'université Joseph Fourier, 180 p.

NAAIM, M., FAUG, T., NAAIM-BOUVET, F., 2003, *Gravitational granular flow modelling: erosion and deposition processes around obstacles and singularities*, *Surveys in Geophysics*, (accepted for publication), 12 p.

O'BRIEN, J.-S., JULIEN, P.-Y., FULLERTON, W.-T., 1993, Two-dimensional water flood and mudflow simulation, *Journal of hydraulic engineering*, vol. 119, n° 2, p. 244-261.