

modèles précédents étaient donc insuffisants et ne rendaient pas compte de la réalité.

Dans notre laboratoire *Érosion torrentielle, neige et avalanches*, au CÉMA-GREF, nous avons commencé par modéliser le transport de la neige et son effet sur le profil du manteau neigeux. Or, des expériences effectuées au Japon et en Norvège avaient mis au jour l'existence d'un échange de matière et de quantité de mouvement entre la couche dense et la couche aérosol d'une avalanche mixte. Cet échange est responsable de la formation et de la croissance de l'aérosol. Le transport de la neige sur un manteau statique pouvait ainsi s'appliquer sur un écoulement dense en mouvement : la modélisation des avalanches mixtes devenait possible.

Dans notre modèle du transport de la neige par le vent, la couche de neige transportée est décomposée en deux zones : la couche de saltation, où les grains de neige retombent sur le manteau neigeux, et la couche de suspension, où la concentration en grains de neige est faible et où ces grains sont maintenus en l'air par la turbulence de l'air. La couche de saltation correspond à la couche immédiatement en contact avec le manteau neigeux. Les grains de neige, arrachés par les forces aérodynamiques, ont des trajectoires paraboliques. Dans cette couche, ils atteignent jusqu'à 80 pour cent de la vitesse de l'air et retombent avec une énergie cinétique forte pour déloger d'autres grains de neige. Dans notre modèle, cette couche de saltation est décrite par son épaisseur, c'est-à-dire la hau-

teur des rebonds, sa concentration et les vitesses des grains et de l'air. Le modèle des échanges entre les deux couches tient compte de l'interaction entre la phase fluide et la phase solide, ainsi que de l'érosion de la couche dense et du dépôt des grains de la couche aérosol lorsque la turbulence de l'air diminue.

Les avalanches mixtes

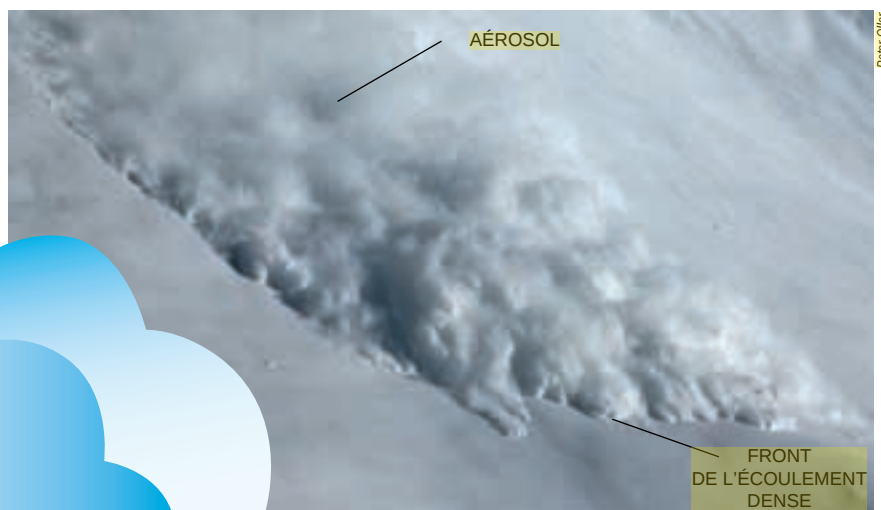
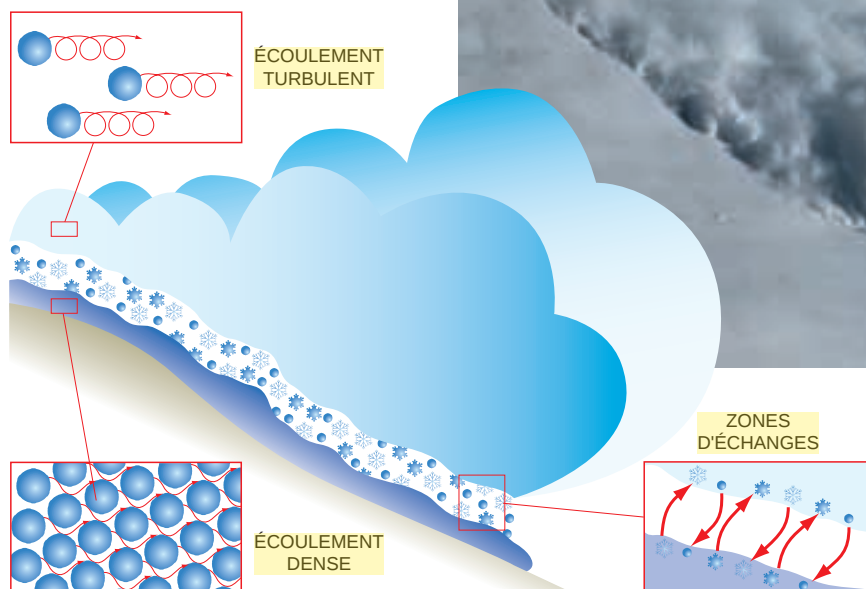
Notre modèle des avalanches mixtes, qui découle du modèle précédent, traite l'écoulement, du moment où il se déclenche jusqu'à son arrêt. La couche inférieure, la plus dense, se comporte comme un écoulement dense dont le paramètre principal est le frottement sur la neige immobile. Notre simulation se fonde sur les lois de conservation de la matière et de la quantité de mouvement, complétées par des modèles issus de la théorie des milieux granulaires. Dans les équations des écoulements denses, on intègre des termes qui représentent les flux de masse et de quantité de mouvement échangés, d'une part, entre la phase dense et la neige immobile et, d'autre part, entre la phase dense et la phase aérosol. À mesure que l'aérosol progresse, il incorpore de l'air, son volume augmente et le nuage de neige qui le compose s'étend.

Nous supposons que la zone qui sépare les deux couches de l'écoulement se comporte à la manière d'une couche de saltation. Nous retrouvons

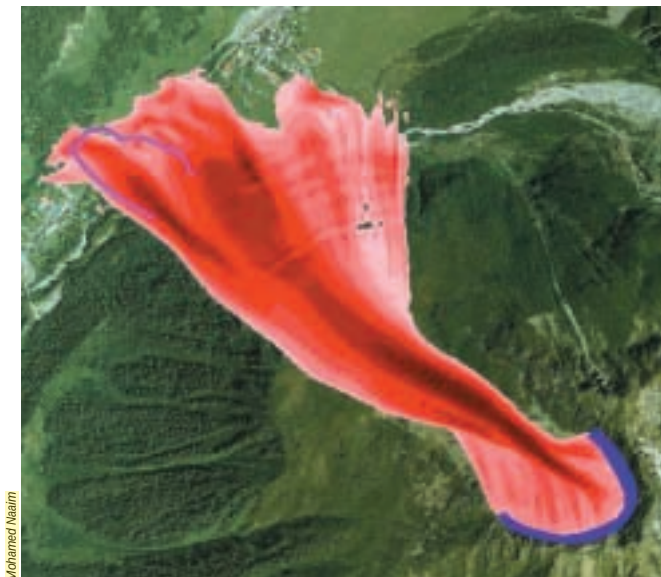
dans les équations de cette zone les termes des flux de masse et de quantité de mouvement échangés : ils représentent l'érosion ou le dépôt des grains de neige. La quantité de neige prélevée est proportionnelle à la différence des contraintes exercées par les turbulences de l'aérosol et les forces qui résistent à l'arrachement des particules.

Avant de tester nos modèles numériques, nous devons donner des valeurs aux paramètres des équations : par exemple, la densité de la neige, l'angle limite de stabilité au-delà duquel une quantité de neige donnée se décroche, l'épaisseur des couches en jeu et la géométrie du couloir emprunté... Les valeurs de ces paramètres sont mesurées soit par des mesures effectuées sur le terrain, soit lors d'expériences en laboratoire.

Pour les expériences sur le terrain, le CÉMA-GREF dispose d'un site expérimental, partagé avec le Centre d'études de la neige, situé à 2 700 mètres d'altitude dans le massif des Grandes Rousses, près de L'Alpe-d'Huez. Sur ce site, l'évolution du manteau neigeux (l'épaisseur et la composition) est suivie dans des zones de dépôt et d'érosion grâce à des sondages, et les paramètres météorologiques sont enregistrés automatiquement. Le transport de la neige par le vent est également suivi, grâce à des capteurs acoustiques. Il s'agit de microphones miniatures placés dans des tubes creux d'aluminium

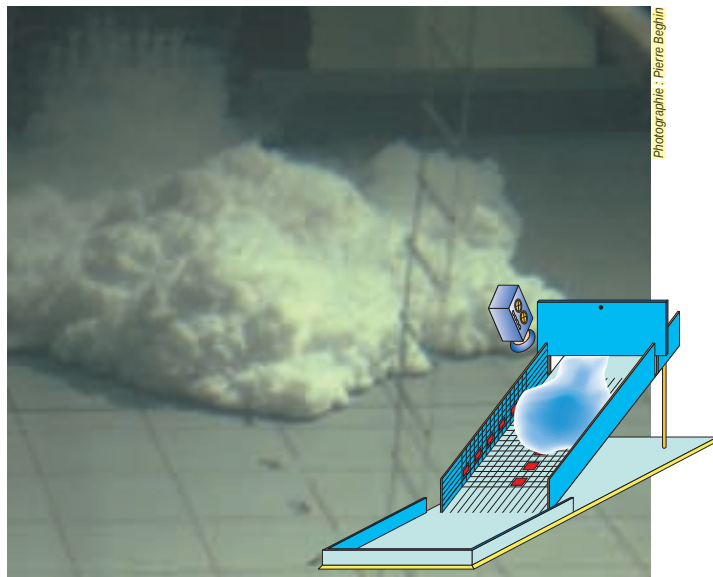


7. LES AVALANCHES MIXTES, telle celle du Bourgeat, en Savoie, (*en haut*) sont constituées de deux écoulements. Le premier est un écoulement dense (couches inférieures) où les frottements dominent. Le second est turbulent (couches supérieures) : les cristaux ne se touchent plus. Les deux écoulements sont séparés par une zone d'échange de matière et de quantité de mouvement.



Mohamed NAAIM

8. LA SIMULATION NUMÉRIQUE de l'avalanche de MontRoc, près de Chamonix, en Haute-Savoie, montre l'onde de pression (plus le rouge est foncé, plus la pression est forte) de la neige détachée de la zone de départ (en bleu, en bas à droite). L'écoulement dense, dont la zone d'arrêt, dans le village même, est marquée en violet, a suivi deux couloirs différents.



Photographie : Pierre Beghin

9. PAR DES EXPÉRIENCES EN LABORATOIRE, on mesure les paramètres des modèles numériques. Une masse de neige artificielle est libérée par une trappe sur un plan incliné muni de capteurs (en rouge sur le schéma) et filmé par une caméra. Dans un autre type d'expériences, les écoulements aérosols sont simulés par des suspensions de particules dans un bassin rempli d'eau (photographie).

exposés au flux de particules. Les sons des impacts des particules sont convertis en signaux électriques. Un filtrage élimine les basses fréquences dues au vent et les hautes fréquences parasites.

Des paramètres à la validation

Par ailleurs, nous étudions en laboratoire le comportement de matériaux modèles (poudre dérivée de la chaux, différents sables, billes de polychlorure de vinyle, sciure de bois) sur des plans inclinables équipés d'une caméra vidéo et de capteurs qui mesurent l'épaisseur de l'avalanche et les contraintes exercées sur le fond du canal lors de son passage.

Nous simulons également des écoulements aérosols dans des bassins d'eau où s'écoulent des suspensions de particules. Ainsi, l'écoulement est suffisamment lent pour être suivi avec précision (voir la figure 9). Les résultats des modèles numériques sont ensuite validés par comparaison avec les résultats des expériences en laboratoire et sur le terrain. Nos résultats numériques s'accordent avec les résultats expérimentaux, aussi bien pour les écoulements aérosols que pour les écoulements denses.

Enfin, nous validons nos modèles par des reconstitutions d'événements : il s'agit d'une justification globale des résultats par rapport à des données

d'enquêtes sur le terrain telles que les limites de l'avalanche, les dégâts, l'estimation de la zone de départ, l'estimation de l'épaisseur de neige initiale.

Par exemple, nous avons reconstitué l'avalanche du Bourgeat, en Savoie, et l'avalanche du Tour, à Chamonix (voir la figure 8), qui ont provoqué des dégâts importants dans des zones habitées. Nous avons, d'une part, relevé l'ensemble des informations de terrain laissées par l'avalanche et, d'autre part, étudié les conditions météorologiques qui ont produit cet événement. Le manteau neigeux était composé uniquement de la neige fraîche tombée durant les 24 heures précédentes. Le modèle a reproduit précisément le champ de pression dans la zone des dégâts. Ce protocole a été appliqué à cinq couloirs différents, dont les géométries et les topographies sont des archétypes de couloirs d'avalanches. Pour chacun, la comparaison des relevés sur le terrain et des résultats du modèle numérique a permis de reproduire les limites des cinq avalanches observées. Pour les couloirs étudiés, la simulation permet de

modifier des paramètres et de simuler les conséquences d'événements plus catastrophiques que ceux observés. Pour les couloirs mal connus, on procède par analogie avec des couloirs bien étudiés.

Ainsi, les collectivités seront en mesure d'optimiser le zonage d'une région, c'est-à-dire d'identifier les domaines où les implantations d'habitations et d'équipements sont déconseillées, risquées ou sans danger.

En outre, nous espérons créer un environnement commun européen pour le zonage assisté par ordinateur, alliant la modélisation numérique, les capacités des systèmes d'informations géographiques et les données du terrain. Les modèles présentés ne rendent pas encore compte de toute la complexité des avalanches, mais ils sont suffisants pour établir les scénarios possibles le long d'un couloir donné. Ajoutés à d'autres sources d'informations, notamment les données historiques et l'interprétation de photos aériennes, les modèles informatiques participent déjà à la prévention des avalanches.

Mohamed NAAIM est chargé de recherche au CEMAGREF, à Grenoble. Florence BOUVET-NAAIM est ingénieur de recherche au CEMAGREF. Lionel VIDAL est ingénieur à la Société Transmontagne.

F. BOUVET-NAAIM, M. PRAT, J.-A. CALGARO et J. RAOUL, *La neige : recherche et*

réglementation, CEMAGREF et Presses de l'École nationale des Ponts et Chaussées.

M. NAAIM, F. BOUVET-NAAIM et H. MARTINEZ, *Numerical Simulation of Chifting Mow : Erosion and Deposition Models*, in *Annals of Glaciology*, n° 26, pp. 212-216, 1997.