

incorpore. En revanche, dans la zone de faible pente, la partie dense, freinée par les frottements, s'arrête rapidement, tandis que la partie poudreuse en aérosol, entraînée par son inertie, parcourt une plus grande distance avant de s'arrêter.

En surface d'un écoulement dense, les particules de neige sont soulevées et mises en suspension dans l'air turbulent. La turbulence tend à maintenir les grains de neige en suspension, tandis que la gravité les entraîne vers le sol. Dans un aérosol, l'équilibre – ou le déséquilibre – entre ces deux forces détermine l'évolution de l'écoulement. Quand la turbulence de l'air l'emporte, l'écoulement s'amplifie ; à l'inverse, lorsque la gravité domine, l'aérosol régresse.

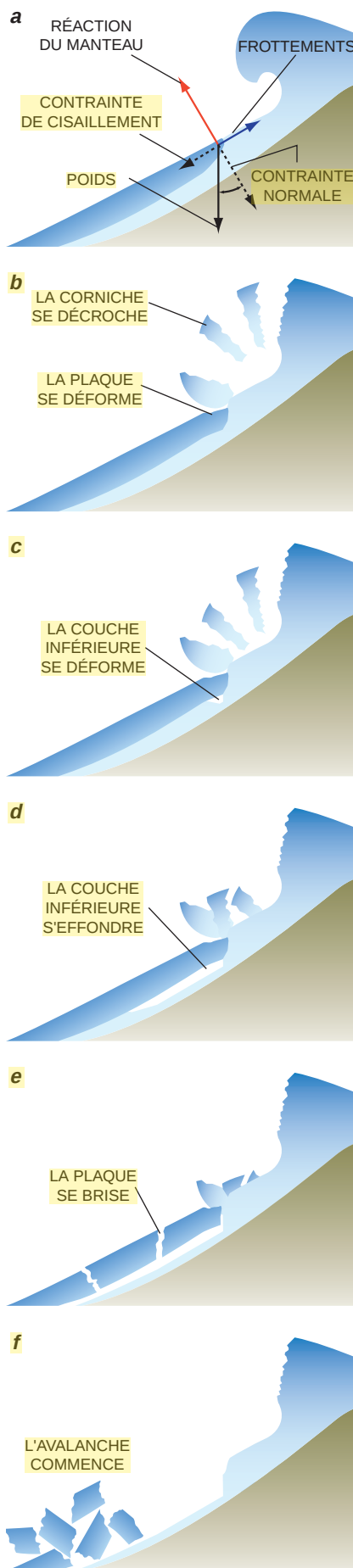
Connaissant la physique de la formation des couches de neige, du transport de la neige par le vent et du déclenchement des écoulements, nous avons modélisé la formation des avalanches catastrophiques et, pour les avalanches mixtes, les transitions et les échanges entre les deux phases de l'écoulement.

Modélisation et prévention

La modélisation du transport de la neige par les avalanches a longtemps consisté en des simulations effectuées sur des maquettes dans des souffleries. Cependant, celles-ci ne rendent pas compte de la complexité des phénomènes en jeu. Aussi, la modélisation physique a progressivement été remplacée par la simulation numérique.

Dans un premier temps, les écoulements denses et les aérosols étaient simulés par des modèles distincts. Par exemple, les avalanches denses étaient simulées par des modèles dits de la dynamique du point, dans lesquels l'écoulement est un bloc indéformable, assimilé à un point dont on étudie la trajectoire.

Puis, dans les années 1980, des modèles plus complexes sont apparus pour les avalanches aérosols : elles étaient étudiées comme l'écoulement d'une suspension. Toutefois, la plupart des avalanches catastrophiques sont composées d'une partie dense en contact avec le sol et d'une partie aérosol qui recouvre la partie dense. Les



6. UNE PLAQUE à l'équilibre (a) est soumise à son poids (en noir), à des forces de frottements du reste du manteau neigeux (en bleu) et à la réaction du manteau neigeux. L'ensemble des contraintes qui s'exerce sur la couche inférieure se décomposent en une composante normale et une composante tangentielle, nommée contrainte de cisaillement. La chute d'une corniche entraîne la rupture de la plaque. Sous la surcharge, la plaque en se déformant (b) écrase la couche inférieure (c). Cette dernière s'effondre de proche en proche (d) : les forces de frottements avec le reste du manteau neigeux ne suffisent plus à retenir la plaque, qui se brise (e et ci-dessus), se décroche, et dévale la pente (f).

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

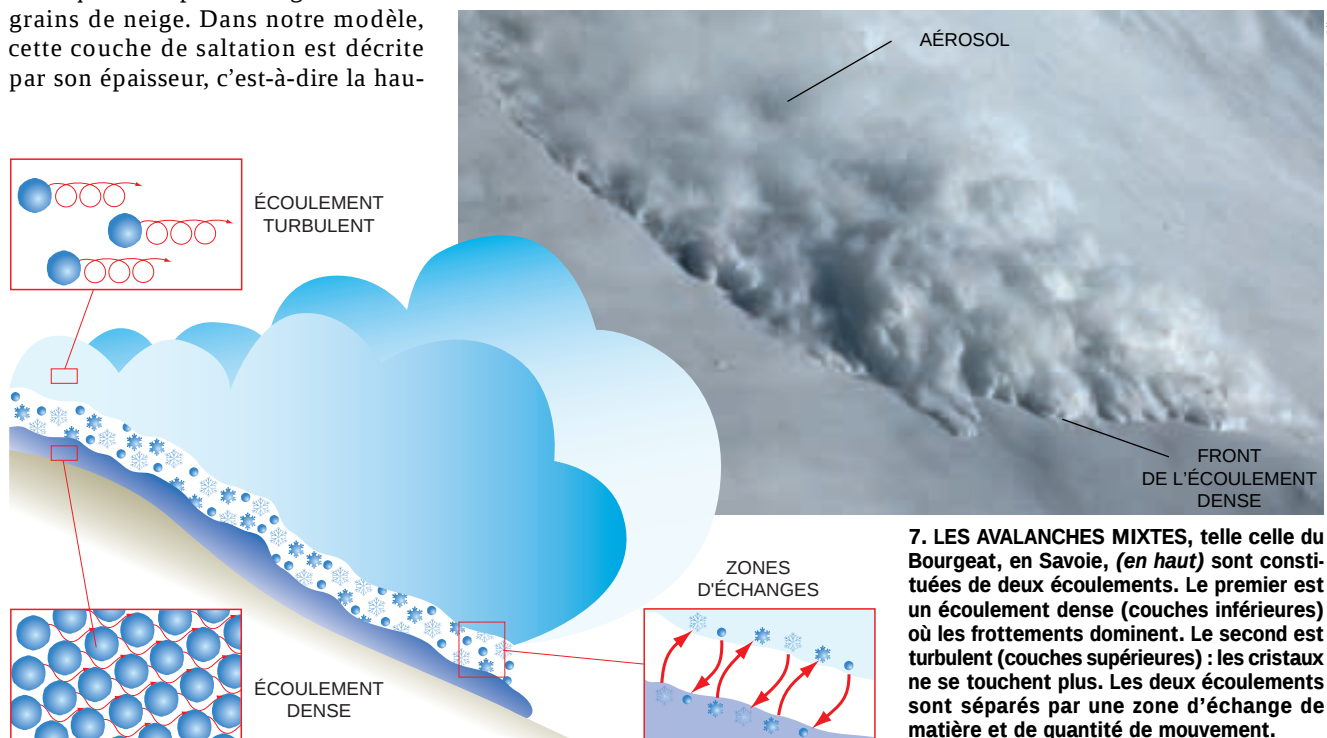
Notre modèle des avalanches mixtes, qui découle du modèle précédent, traite l'écoulement, du moment où il se déclenche jusqu'à son arrêt. La couche inférieure, la plus dense, se comporte comme un écoulement dense dont le paramètre principal est le frottement sur la neige immobile. Notre simulation se 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.