

RETROUVEZ

POURLA

SCIENCE

AU 20^e SALON DU LIVRE
DU 17 AU 22 MARS 2000

sur notre stand (E 120)
et sur celui des
Éditions Belin (F88)
dans le Hall 1
à la Porte de Versailles

CONFÉRENCES AU BAR DES SCIENCES

« Science et gastronomie »

avec Hervé This, rédacteur
en chef de *Pour la Science*
Vendredi 17 mars à 15 h 30

« Comment faire aimer les mathématiques ? »

avec Jean Brette du Palais
de la Découverte, Jean-Paul
Delahaye, professeur
à l'Université de Lille,
Maurice Mashaal, journaliste
scientifique, Didier Nordon,
maître de conférences
à l'Université de Bordeaux.
Débat animé par Loïc Mangin,
journaliste à *Pour la Science*
Dimanche 19 mars à 15 h 30

« Sur la piste des scientifiques »

Jeu-concours conçu par
Armelle Ehrlich. Découvrez,
à partir d'énigmes, la vie
de scientifiques célèbres.
Et gagnez de nombreux
cadeaux.

Mercredi 22 mars à 17 h

➔ **Entrée gratuite** pour les
conférences sur demande
par télécopie
(01 55 42 84 54),

➔ **e-mail** (communication@
pouirlascience.fr)

➔ **Courrier** (Communication -
8, rue Férou 75 278 Paris
cedex 06).

➔ **Pour plus d'information,**
consultez notre site :
www.pouirlascience.com

des fonds donnés par les pays riches aux pays pauvres pour le contrôle des naissances risque d'avoir trois conséquences non exclusives.

Premièrement, l'ISF pourrait rester supérieur aux estimations de l'ONU : de ce fait, la population augmenterait jusqu'au XXII^e siècle. Par exemple, au Nigeria (108 millions d'habitants), un ISF de 2,1 enfants atteint en 2010, 2030 ou 2050 correspondrait respectivement à une stabilisation de la population en 2100 à 290, 450 ou 700 millions d'habitants. Dans le deuxième cas, la densité de population serait supérieure de 40 pour cent à la densité actuelle aux Pays-Bas. En pratique, le troisième cas est impossible, car les maladies et les famines limiteraient la population.

Deuxièmement, l'insuffisance des politiques de planning familial pourrait pousser les gouvernements à recourir à des mesures autoritaires de contrôle des naissances, telles celles qui sont appliquées en Chine. Dans les années 1950 et 1960, Mao Tse-toung était partisan des familles nombreuses, pour des raisons idéologiques. Quand les Chinois ont compris qu'ils devaient ralentir leur croissance démographique, en 1979, la population augmentait si rapidement que le gouvernement a dû interdire aux couples d'avoir plus d'un enfant. Même avec une telle politique, le nombre de Chinois est passé de 989 millions à 1,25 milliard aujourd'hui : cette augmentation correspond à un peu moins que la population totale des États-Unis, dans un pays qui a environ la même superficie.

Troisièmement, le nombre d'avortements pourrait augmenter. Aujourd'hui, chaque femme avorte en moyenne une fois. D'après un calcul récent fondé sur des données africaines, sans distribution de contraceptifs les femmes devraient avorter six fois plus pour que l'ISF reste conforme aux estimations de l'ONU. Cette augmentation du nombre d'avortements tuerait des milliers de femmes, parce qu'ils auraient lieu dans de mauvaises conditions sanitaires.

Dans les prochaines années, le succès ou l'échec des politiques de contrôle des naissances divisera le monde en deux. Les pays récemment industrialisés d'Asie et d'Amérique latine qui stabiliseront leur ISF à 2 enfants ou moins, d'ici 2010, rejoindront le club des pays riches. Leur population vieillira lentement : le nombre de leurs

citoyens de 60 ans et plus doublera d'ici 2050. Les autres pays, notamment en Afrique et dans le sous-continent indien, seront dépassés par l'accroissement fulgurant de leur population. Un nombre considérable de jeunes gens ne recevront aucune éducation et seront privés d'emploi. Certains formeront peut-être des gangs dans des bidonvilles politiquement instables. D'autres essaieront de subsister en coupant les dernières forêts.

La conférence du Caire a reconnu que le développement durable du Globe imposait une stabilisation rapide de la population mondiale. Ce développement durable est peut-être le plus grand problème jamais rencontré par l'humanité : comment construire un monde où l'on ne consommera pas plus de ressources que ce que l'environnement n'en produit et où l'on ne polluera pas plus que la biosphère ne peut absorber ?

Pour assurer le succès d'une telle transformation, les sociétés humaines devront réduire leur consommation et leur population. Même aujourd'hui, les ressources de la Terre ne suffiraient pas à assurer un train de vie à l'occidentale pour tout le monde. Beaucoup d'experts prédisent que dès 2025, un milliard de personnes manqueront d'eau.

Heureusement, on sait aujourd'hui comment donner aux populations la possibilité de contrôler les naissances. Il en coûterait aux pays industrialisés moins de 25 francs par personne et par an, ce qui est négligeable par rapport au coût financier, environnemental et humain de l'inaction.

Malcolm POTTS est professeur en santé publique à l'Université de Berkeley.

Steven SINDING, John ROSS et Allan ROSENFELD, *Seeking Common Ground : Demographic Goals and Individual Choice*, Population Reference Bureau, Washington, D.C., mai 1994.

Hopes and Realities : Closing the Gap between Women's Aspirations and Their Reproductive Experiences, Alan Guttmacher Institute, New York, 1995.

Malcolm POTTS, *Sex and the Birth Rate : Human Biology, Demographic Change and Access to Fertility-Regulation Methods*, in *Population and Development Review*, vol. 23, n° 1, pp. 1-39, mars 1997.

6 Billion : A Time for Choices. The State of World Population 1999, UNFPA, United Nations Population Fund, New York, 1999.

La physique des avalanch

M. NAAIM • F. BOUVET-NAAIM • L. VIDAL

Une meilleure compréhension de la physique des avalanches et la modélisation de leurs mécanismes améliorent la prévention des risques.

Au XVIII^e siècle, la neige était vitale pour les montagnards. Chaque hiver, ils l'attendaient pour transporter sur des traîneaux le bois et le fourrage stockés en altitude pendant l'été. Elle protégeait également du gel les terres ensemencées et fournissait de l'eau, au printemps, au moment de la fonte. Aujourd'hui, grâce aux véhicules mécaniques, l'homme dépend moins des conditions climatiques. Pourtant, l'or blanc est devenu le cœur de l'économie de la plupart des régions montagneuses qui accueillent tous les ans les adeptes des sports de glisse. Hélas, trop de neige nuit et, chaque saison, les dégâts et surtout les victimes des avalanches nous rappellent les dangers de la montagne. Par exemple, le 23 janvier 1998, l'avalanche des Orres a fait 11 victimes, ou, plus récemment, le 29 janvier 2000, l'avalanche de Thones, près d'Annecy, quatre victimes. Peut-on comprendre ce qui semble être un caprice de la nature pour en éviter les conséquences dramatiques ?

Si toutes les avalanches sont des écoulements rapides d'une masse de neige le long d'une pente sous l'effet de la gravité, elles diffèrent par leur ampleur et par divers paramètres physiques, notamment la compacité du manteau neigeux (la superposition de couches de neige différentes) et des écoulements, ainsi que par l'adhérence des couches de neige entre elles. Jusqu'à aujourd'hui, dans les modélisations des écoulements de neige, ces caractéristiques et les contingences naturelles n'avaient pas été suffisamment prises en compte. Les modèles étaient loin de la réalité.

En étudiant les phénomènes de transport de la neige par le vent, nous avons détaillé la dynamique des avalanches, de leur déclenchement à leur arrêt. Ainsi, à partir de l'analyse des différentes étapes, c'est-à-dire la formation du manteau, sa rupture et l'écoulement lui-même, nous pouvons désormais simuler la plupart des avalanches majeures. Ces reconstitutions aident les collectivités à améliorer leurs plans d'occupation des sols et d'aménagement du territoire.

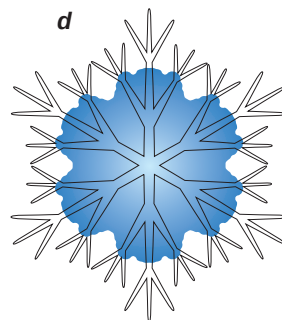
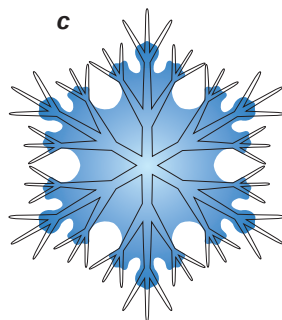
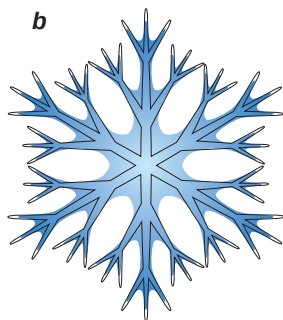
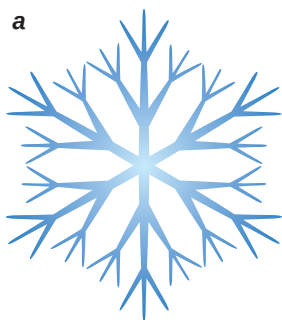
Le manteau neigeux

De sa formation en haute altitude jusqu'à sa fonte au printemps, la neige subit des métamorphoses qui modifient sa structure, sa cohésion, ainsi que les formes des cristaux. Dans un nuage, la neige cristallise sous des formes variées selon la température. Par exemple, lorsque la température est inférieure à -12°C , les cristaux ont une forme d'étoile ; quand la température est comprise entre -6 et -10°C , la neige tombe sous la forme de bâtonnets. Au sol, ces cristaux subissent également de nombreuses transformations en fonction du gradient de température qui règne à l'intérieur du manteau neigeux. Ce gradient varie selon le moment de la journée : au soleil, la surface est plus chaude que les couches enfouies ; inversement, pendant la nuit, la terre rayonne la chaleur emmagasinée, et les couches basses sont plus chaudes que la surface. Les métamorphoses des cristaux sont plus importantes la nuit, car les variations de température en fonction de la profondeur sont plus prononcées. Détaillons

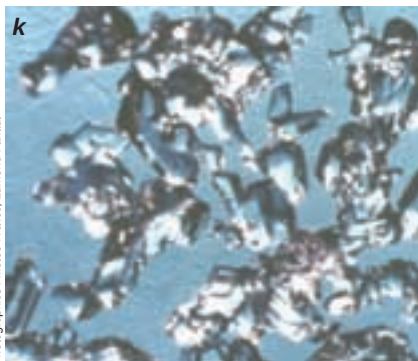


1. AU COL D'ORNAN, en Isère, le nuage de neige d'un écoulement aérosol dévale une pente.





0,5 MILLIMÈTRE



5 MILLIMÈTRES

Photographies : Météo-France, Edmond Pelaut

2. LA FORME D'UN CRISTAL DE NEIGE varie selon la température. L'eau des excroissances d'un cristal en étoile se sublime, puis se condense dans les cavités (a et j). Le cristal s'émousse et devient un grain sphérique (de b à e). Ce dernier évolue encore et acquiert une forme pyramidale dite en «gobelet» (k et de f à i) lorsque la partie supérieure du grain se sublime tandis que de l'eau se condense sur sa partie inférieure.

un des scénarios possibles d'évolution des cristaux de neige.

La cohésion des cristaux en forme d'étoile, qui résulte de l'enchevêtrement des ramifications de ces cristaux, est faible (voir la figure 3). Quand la température varie peu dans l'épaisseur d'une couche (moins de 0,05 °C par centimètre), les cristaux en étoile évoluent spontanément vers une forme thermodynamiquement plus stable : les aspérités des étoiles se subliment, c'est-à-dire qu'elles passent de l'état

solide à l'état gazeux. Cette vapeur d'eau se condense au contact des zones concaves, au voisinage de la partie centrale des cristaux : les cavités se remplissent de glace. L'étoile s'émousse et prend peu à peu une forme sphérique nommée grain fin. Cet état compact confère à la couche une cohésion élevée grâce aux ponts de glace qui se forment : les points de contact des cristaux délimitent aussi des cavités où la vapeur d'eau se condense et relie les cristaux entre eux. Quand la température varie davantage (supérieure à 0,2 °C par centimètre), les grains fins se transforment à nouveau, car le gradient de température crée des zones plus chaudes où la sublimation est favorisée et des zones plus froides propices à la condensation : c'est toute la surface supérieure des grains qui se sublime, tandis que, sur la partie basse, l'eau se condense, s'accumule et cristallise : le grain acquiert une forme de pyramide, dite en «gobelet» (voir la figure 2). En raison des angles saillants, ces cristaux adhèrent moins les uns aux autres ; les couches de gobelets, dites «fragiles», sont moins stables.

Enfin, lorsque la température est proche de 0 °C, la neige s'humidifie et fond partiellement. Le film d'eau règle parfois : la cohésion de ces croûtes de regel, est forte. Le Centre d'étude de la neige de Météo-France, qui utilise aujourd'hui les rayons X pour étudier les transformations des cristaux de neige, a identifié plus de 1 000 types de particules neigeuses dont la formation dépend des échanges thermiques au sein de la couche et de la géométrie des cristaux. Les chutes de neige successives et les transformations des cristaux selon les variations climatiques constituent un manteau neigeux hétérogène et stratifié dont les propriétés mécaniques, notamment la cohésion, varient d'une couche à l'autre.

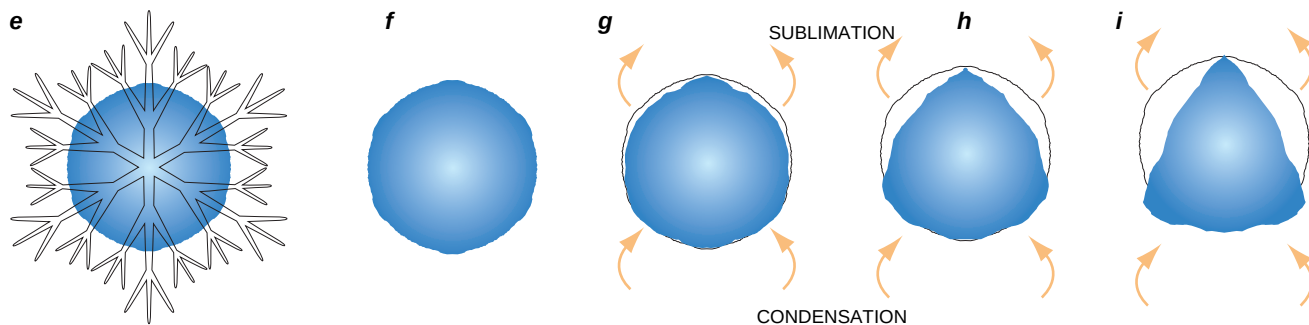
De plus, le vent transporte la neige tombée, il modifie sa répartition et le profil du manteau neigeux. Un vent suf-

fisamment fort arrache des grains de neige fraîche et les emporte jusqu'à ce qu'ils retombent sous l'effet de la gravité. Quand leur énergie cinétique est suffisante, ils expulsent à leur tour de nouveaux grains de neige (un grain arrache jusqu'à une dizaine d'autres grains) qui, par un effet «boule de neige», déplacent une quantité importante de neige. Ce phénomène, nommé saltation, est identique à celui de la formation des dunes de sable. Lorsque la vitesse du vent augmente, la saltation est prolongée au-dessus par une mise en suspension des grains de neige qui ne touchent plus le sol : leur déplacement devient turbulent (voir la figure 4).

Les plaques

En haute montagne, lorsque le vent accumule de la neige à proximité d'une crête, les risques d'avalanche sont renforcés. Sur la face exposée de la crête, le vent arrache des grains de neige fraîche, par exemple des cristaux en étoile, et les emporte. Avant la crête, le vent accélère par effet Venturi, selon lequel, en présence d'un goulet d'étranglement, la pression d'un fluide qui s'écoule diminue tandis que sa vitesse augmente. Au moment de l'arrachement et pendant le transport, les cristaux de neige sont brisés et deviennent sphériques. Après la crête, le vent ralentit : les cristaux se déposent et s'accumulent. Certains de ces cristaux de neige forment une corniche au sommet de la crête, d'autres s'accumulent sur le versant montagneux situé en aval et, grâce à la formation de ponts de glace, forment une plaque cohésive (voir la figure 5). Nous nous limiterons à l'étude du comportement de ces plaques créées par le transport éolien de la neige, dont on estime que les ruptures sont responsables d'environ 80 pour cent des avalanches majeures.

Les précipitations successives, ainsi que le transport de la neige par le vent sont responsables de la stratification



du manteau neigeux et de la formation des plaques. L'existence d'une couche fragile enfouie et la mauvaise adhérence des strates créent ainsi des zones de fragilité et d'instabilité. Quels sont les différents modes de rupture liés à cette stratification ? Nous avons étudié le cas simple de la superposition de deux couches : une plaque qui repose sur une couche fragile.

À l'équilibre, une plaque est soumise à son poids ; aux frottements avec la couche inférieure et avec la neige située sur les côtés ; à la résistance à la traction de la zone d'ancrage en amont et à la résistance à la compression du manteau neigeux en aval. Cette plaque exerce sur la couche inférieure une contrainte définie par le rapport de la force (ici le poids de la plaque) sur sa surface : elle se décompose en une composante perpendiculaire à cette surface et en une composante tangentielle (parallèle à la pente). Cette composante tangentielle est la contrainte de cisaillement de la couche inférieure.

Lorsque la neige s'accumule sur une plaque, la couche fragile inférieure risque de s'effondrer brutalement sous la charge : les forces de frottement sous la plaque s'annulent, les résistances et les frottements restants ne suffisent plus à la retenir ; elle se détache et dévale la pente.

En d'autres termes, la plaque qui compose l'avalanche se désolidarise du manteau neigeux d'abord parallèlement au sol, puis perpendiculairement au reste du manteau neigeux qui reste en place.

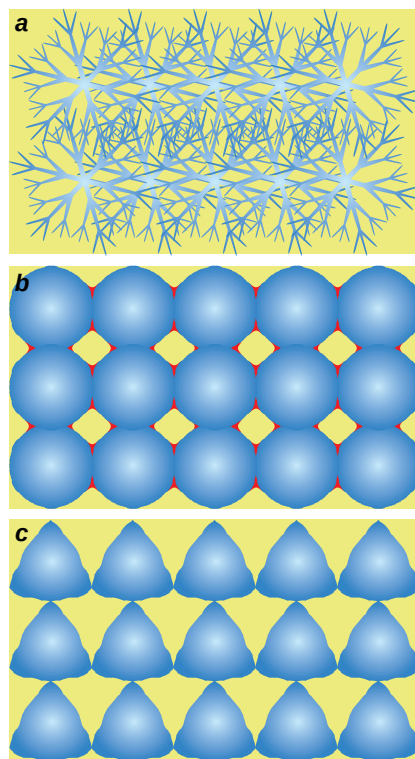
Cette instabilité est renforcée par le déséquilibre dans la répartition de la neige au sein d'une plaque : pour un même volume de neige, la surface des bords d'une plaque épaisse de trois mètres en son centre et de quelques dizaines de centimètres à la périphérie est inférieure à celle des bords d'une plaque homogène dans son épaisseur ; ainsi, sur les côtés, les forces de frottement d'une plaque hétérogène sont plus faibles.

Outre le déclenchement spontané, une perturbation locale, tels la chute d'une corniche ou le passage d'un skieur, est souvent la cause d'un écoulement. La surcharge instantanée de la plaque diminue localement l'épaisseur de la couche inférieure. La plaque se déforme alors pour s'adapter localement à la nouvelle géométrie de la couche inférieure. Cette déformation locale se propage dans la plaque, telle une ride à la surface de l'eau : la couche inférieure s'effondre alors de proche en proche ; le contact entre les plaques est rompu, les forces de frottements disparaissent et la plaque se décroche (voir la figure 7). Ce phénomène est d'autant plus probable que la plaque est fine et déformable. En outre, plus la pente est forte, plus le déclenchement est facilité. Désolidarisée du manteau neigeux, la plaque dévale la pente : c'est l'avalanche !

Les différents types d'avalanches

On distingue les avalanches denses où la neige reste compacte, les écoulements aérosols où la neige, mélangée à l'air, forme un nuage, et enfin les avalanches mixtes qui allient les deux types d'écoulement. L'écoulement le plus fréquent est l'avalanche dense qui suit les couloirs naturels, les ravins qui entaillent les versants montagneux : elle dévale les pentes à une vitesse de 20 à 30 mètres par seconde ; sa masse volumique est celle de la neige, de 150 à plus de 450 kilogrammes par mètre cube (l'eau a une masse volumique de 1 000 kilogrammes par mètre cube). En revanche, l'écoulement aérosol, plus rare dans les montagnes européennes, est plus turbulent et plus volumineux, car la neige, qui peut atteindre une vitesse de 60 mètres par seconde, incorpore l'air ambiant : sa masse volumique n'est que de 10 à 40 kilogrammes par mètre cube.

Les dégâts dépendent de l'énergie emmagasinée, de sa répartition au sein



3. LA COHÉSION D'UNE COUCHE dépend du type de cristal : une couche de cristaux en étoiles enchevêtrés (a) ou de gobelets aux angles saillants (c) est peu cohésive et instable. En revanche, grâce aux « ponts de glace » (en rouge), une couche de grains fins (b) est très cohésive, c'est-à-dire compacte et stable.

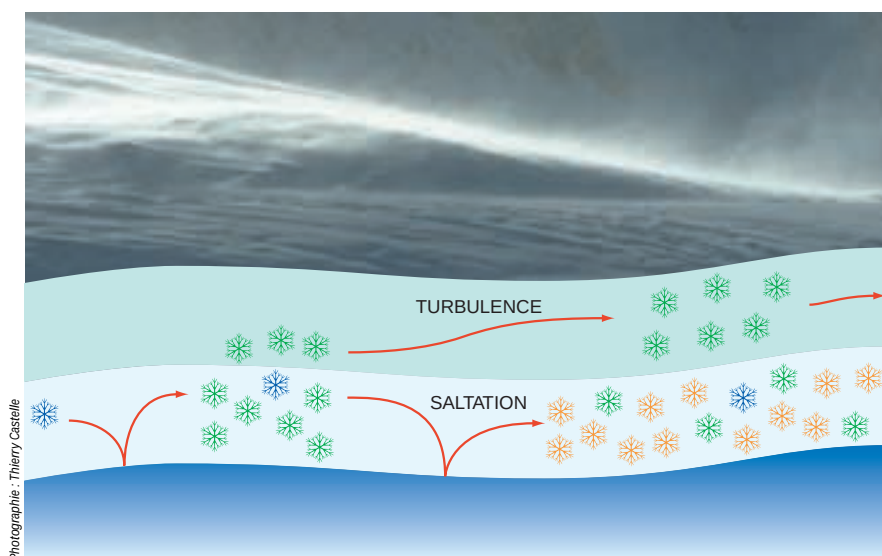
de l'avalanche et des obstacles, du volume de neige mobilisé et des caractéristiques du couloir. Les avalanches denses sont destructrices par la quantité d'énergie cinétique emmagasinée sur la pente parcourue, alors que les avalanches aérosols sont dévastatrices d'abord par le souffle engendré, puis par la vitesse et la turbulence de son écoulement. Les deux types d'écoulement arrachent parfois des arbres et descendent des blocs rocheux qui amplifient encore les dégâts, car ces éléments, plus denses, augmentent localement la pression de l'écoulement.

Les avalanches mixtes, telle celle d'Arinsal, en Andorre, en 1993, qui s'est déclenchée à plus de 2 000 mètres

d'altitude après une forte tempête, font encore plus de ravages : dans la faible pente où elle s'est formée, l'avalanche était un écoulement dense, puis, dans une zone plus pentue, sa vitesse a augmenté et sa couche supérieure s'est transformée en un aérosol. Les premiers étages d'un immeuble ont été brisés par la partie dense, tandis que les étages supérieurs ont été soufflés par l'aérosol. Avec de la neige sèche peu cohésive et sur une forte pente, l'augmentation de la vitesse fait évoluer l'avalanche vers un aérosol. À l'inverse, lorsque la

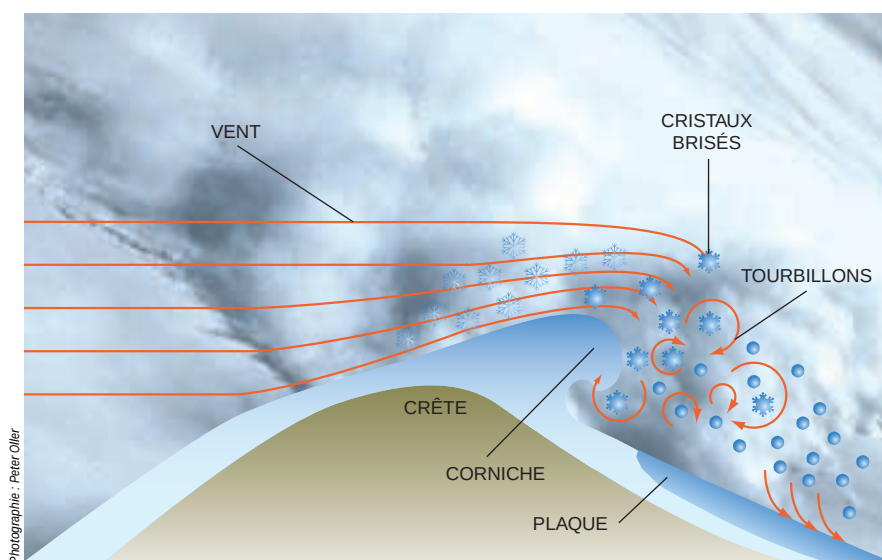
pente diminue, l'effet de la gravité disparaît, et les frottements arrêtent l'avalanche.

Cette première classification, qui distingue les écoulements selon leur masse volumique, n'explique pas tous les types d'écoulements, et nous l'avons complétée par l'analyse des mécanismes physiques. L'écoulement et les transitions entre les différents types dépendent des échanges d'énergie cinétique et de quantité de mouvement (le produit de la masse par la vitesse de la masse en mouvement) entre les constituants de l'avalanche.



Photographie : Thierry Castelle

4. UN CRISTAL DE NEIGE ARRACHÉ par un vent suffisamment fort déloge en retombant d'autres cristaux (cristaux verts) qui en font autant (cristaux orange) : peu à peu, la quantité de neige transportée par ce phénomène de saltation (couche bleu clair) augmente. Lorsque le vent s'accélère, les grains arrachés ne touchent plus le sol et sont emportés par la turbulence de l'air (couche verte).



Photographie : Peter Oller

5. AU-DESSUS D'UNE CRÊTE, le vent accéléré par effet Venturi arrache des cristaux de neige. Derrière la crête, le vent ralentit et forme des tourbillons : les cristaux brisés pendant le transport se déposent et forment, d'une part, une corniche et, d'autre part, une plaque de neige dense et cohésive qui, en se détachant, déclenche les avalanches.

Les transferts d'énergie

Initialement, le manteau neigeux est un milieu hétérogène et anisotrope, mais, après le déclenchement d'une avalanche, le matériau se désagrège, et le fort brassage mélange ses différentes couches et rend la composition de l'avalanche plus homogène.

Dans les avalanches de neige sèche et peu cohésive que nous avons étudiées, les frottements, les chocs ou la turbulence de l'air sont les seuls vecteurs d'énergie. Quand la masse volumique de l'avalanche de neige est élevée et la vitesse de l'écoulement faible, par exemple lorsqu'une avalanche dense dévale un couloir peu pentu, les contacts entre les grains sont longs, et les échanges d'énergie s'effectuent surtout par l'intermédiaire des frottements. Dans cette phase, les frottements entre les grains dominent, tandis que l'effet des chocs et de l'air est négligeable.

Lorsque la vitesse de l'avalanche dense augmente, son volume augmente également, tandis que sa concentration en glace diminue. Dans cette phase, les contacts entre grains sont de plus en plus courts, et la dissipation de l'énergie par frottements diminue au profit d'échanges de quantité de mouvement lors de chocs entre les cristaux de neige. L'écoulement est alors moyennement dense et rapide.

Quand la pente est forte sur une distance importante, la vitesse augmente. Les frottements et la cohésion de la neige étant faibles, les grains de neige sont alors arrachés et mis en suspension dans l'air : la majeure partie ou la totalité de la neige dense est ainsi intégrée dans l'aérosol qui se forme. Dans un écoulement aérosol, les grains sont totalement entourés d'air et n'interagissent plus. Les grains de neige sont portés par l'air, dont la turbulence assure la dissipation de l'énergie.

Pour une avalanche mixte, l'écoulement est composé d'une couche dense recouverte d'une couche de poudreuse en aérosol, qui se forme par l'érosion du sommet de la couche dense. Les deux couches interagissent en échangeant de la masse et de la quantité de mouvement (voir la figure 7). Dans les zones pentues, le front de l'avalanche est constitué de la partie dense, tandis que la partie aérosol est en retrait de 10 à 40 mètres, car elle est freinée par l'air qu'elle

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.

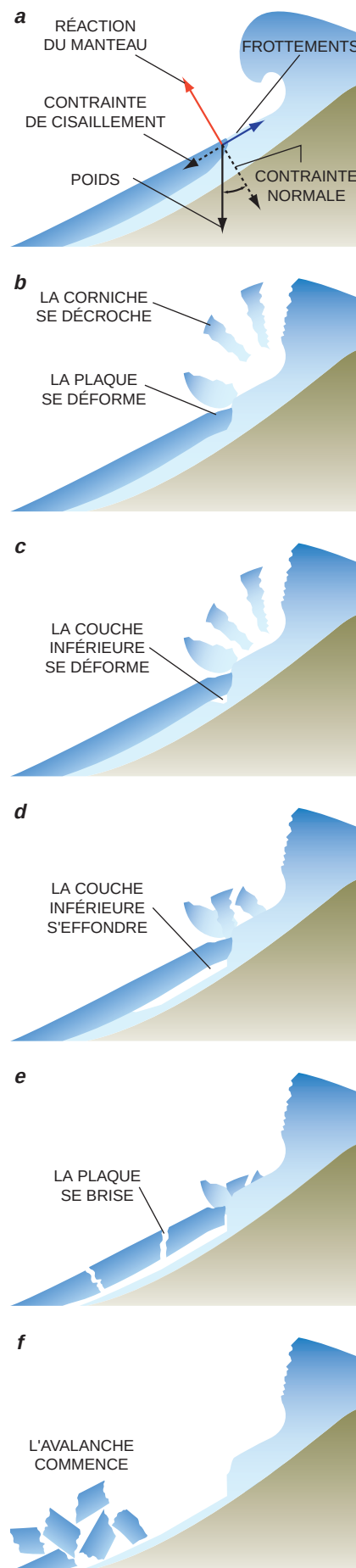
Connaissant la physique de la formation des couches de neige, du transport de la neige par le vent et du déclenchement des écoulements, nous avons modélisé la formation des avalanches catastrophiques et, pour les avalanches mixtes, les transitions et les échanges entre les deux phases de l'écoulement.

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

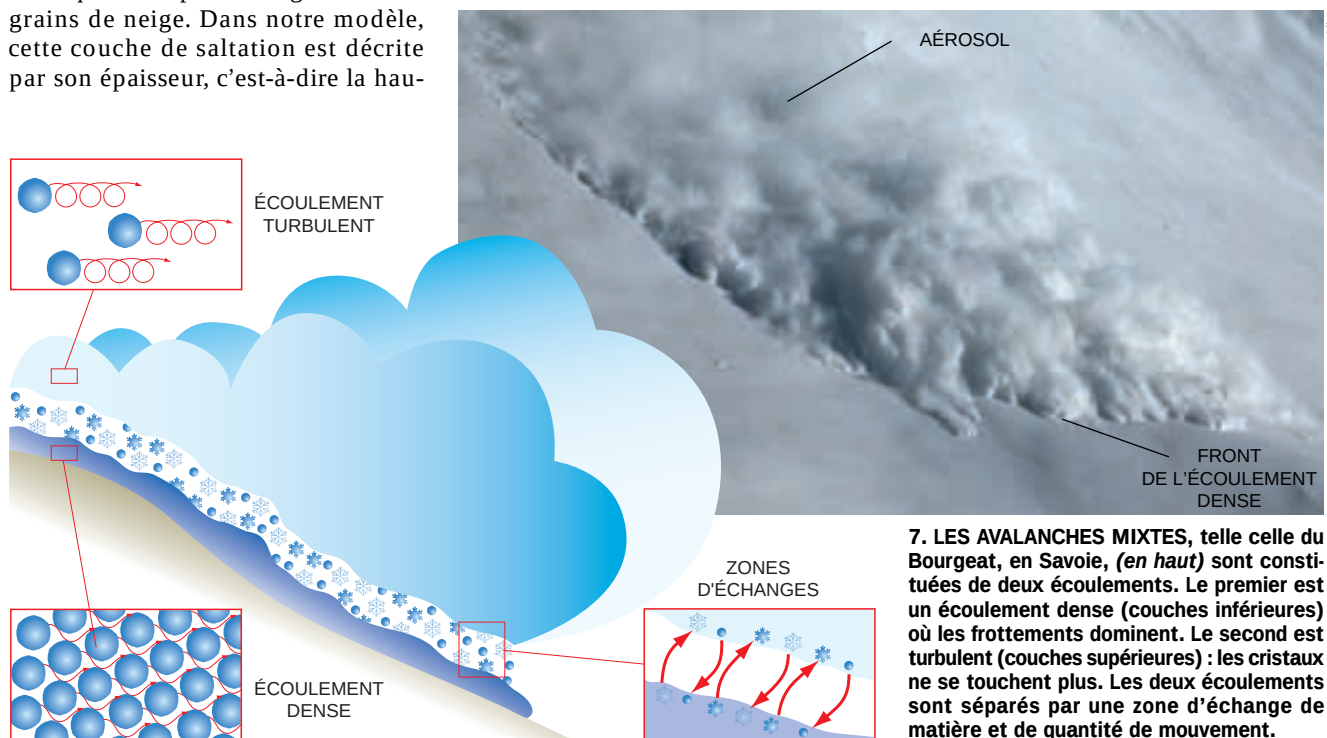
Notre modèle des avalanches mixtes, qui découle du modèle précédent, traite l'écoulement, du moment où il se déclenche jusqu'à son arrêt. La couche inférieure, la plus dense, se comporte comme un écoulement dense dont le paramètre principal est le frottement sur la neige immobile. Notre simulation se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

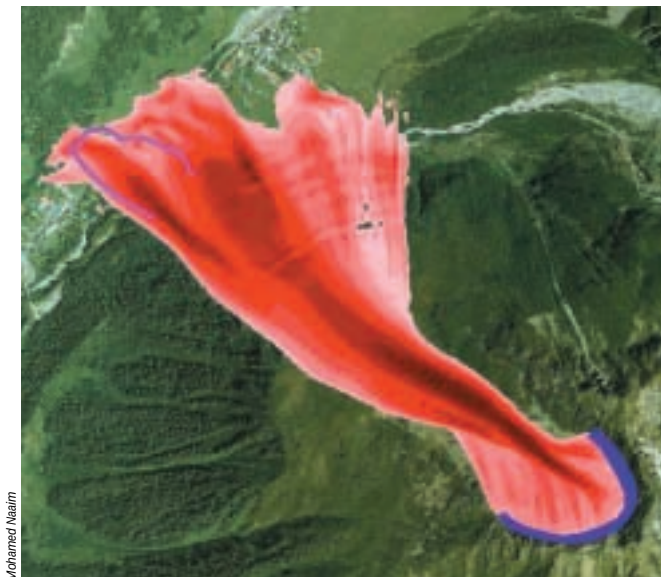
dans les équations de cette zone les termes des flux de masse et de quantité de mouvement échangés : ils représentent l'érosion ou le dépôt des grains de neige. La quantité de neige prélevée est proportionnelle à la différence des contraintes exercées par les turbulences de l'aérosol et les forces qui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

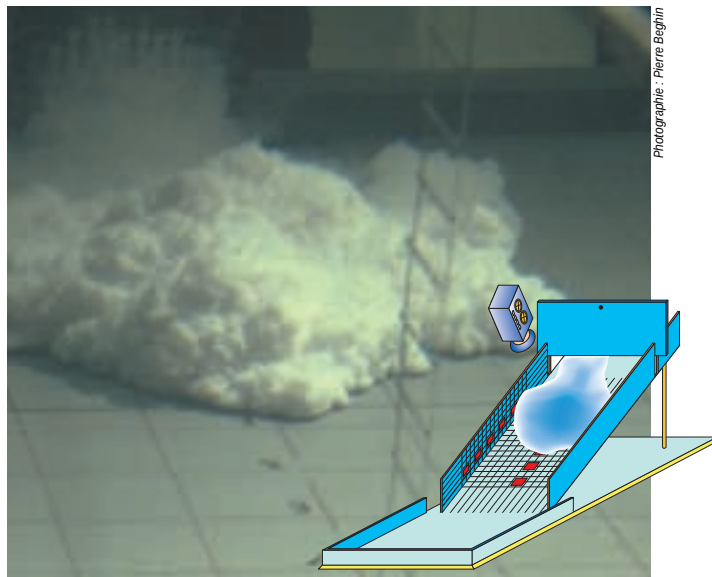


7. LES AVALANCHES MIXTES, telle celle du Bourgeat, en Savoie, (*en haut*) sont constituées de deux écoulements. Le premier est un écoulement dense (couches inférieures) où les frottements dominent. Le second est turbulent (couches supérieures) : les cristaux ne se touchent plus. Les deux écoulements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



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 Snow : Erosion and Deposition Models*, in *Annals of Glaciology*, n° 26, pp. 212-216, 1997.

