Les avalanches extrêmes sont-elles des horsains ?

Quel est le point commun entre un crack boursier et certaines avalanches catastrophiques ? C’est ce que cet article va présenter en s’intéressant au concept des « dragons-rois », des phénomènes extrêmes qui tout en se démarquant des événements connus ont leur propre logique, ce qui les rend sans doute plus prévisibles qu’on ne le croie.

Statistique des extrêmes

En vieux français, le terme horsain ou forain servait à désigner celui qui était étranger à la communauté. Si le mot horsain est devenu désuet en français moderne (il subsiste toutefois dans le parler normand), il a été repris par les statisticiens pour décrire des données qui constituent des anomalies statistiques : une donnée tirée d’un échantillon d’observations constitue un horsain si elle est significativement distante de la distribution de probabilités qui décrit cet échantillon. Autrement dit, il s’agit d’une anomalie, d’une donnée qui n’a pas le même comportement que les autres ; c’est le cas par exemple d’une chute de neige qui serait bien plus forte que toutes les autres chutes enregistrées. En statistique, l’existence d’horsains dans une série de données peut signifier l’une ou l’autre des trois choses suivantes :

- il peut s’agir d’une erreur de mesure ou d’un protocole inadapté (par exemple, une mesure de cumul de neige, qui aurait été modifié sous l’effet
  du transport de neige par le vent) et dans ce cas, on cherche à écarter les valeurs erronées du reste des observations ;
- le horsain peut refléter un comportement statistique

bien particulier. La plupart des lois de probabilités décroissent très rapidement, ce qui implique que les valeurs extrêmes se produisent très rarement. Certaines lois comme la loi de Zipf (qui décrit la fréquence à laquelle on rencontre le même mot dans un texte) ont des taux de décroissance lents, ce qui signifie que des valeurs très grandes peuvent être observées assez fréquemment. Si dans une série de données, l'apparition de horsains est due à la décroissance lente de la distribution de probabilités, alors il faut craindre l'occurrence de phénomènes extrêmes dans un avenir proche ;

- l'existence d'horsains peut indiquer que l'échantillon d'observations n'est pas tiré selon une même loi de probabilités, mais de deux (ou plusieurs) lois. Par exemple, dans la région cévenole, les fortes précipitations sont généralement dues à des dépressions méditerranéennes alors que les précipitations de plus faible intensité sont générées par des flux océaniques. La distribution empirique des pluies permet de distinguer clairement deux populations de pluies selon le type de perturbation, ce qui explique que dans l'extrapolation des distributions statistiques pour déduire les pluies extrêmes, il ne faille retenir que les pluies d'origine méditerranéenne.

Détecter les horsains et en déterminer la nature est donc très important, en particulier si l'on s'intéresse à la gestion des situations extrêmes ou des crises. Pendant longtemps, l'occurrence de horsains a été considérée comme l'indicateur d'existence de loi de probabilités à décroissance lente pour les phénomènes naturels tels que les précipitations, les ouragans, et les tremblements de terre. Un horsain est donc la manifestation d'un phénomène extrême, qui commence de la même façon qu'un phénomène ordinaire, mais prend ensuite des proportions gigantesques. De ce point de vue, un horsain est donc imprévisible puisque sa dynamique résulte d'un

emballement d’un ou plusieurs processus. Dans le milieu économique, une telle théorie a été mise en avant pour expliquer l’explosion des « bulles de spéculation » et l’effondrement des cours boursiers. En biologie, la défaillance du système cardiaque lors d’un infarctus est également vue comme un horsain.

Plus récemment, des scientifiques ont montré que les lois classiques à décroissance lente ne permettaient pas de décrire complètement le comportement de séries de données telles que la taille (en nombre d’habitants) des grandes villes, les tremblements de terre le long de grandes failles, ou la vitesse d’un écoulement turbulent. Un exemple célèbre est celui de la répartition des richesses au sein de la population. Ainsi, au Royaume-Uni, si on étudie la fortune par habitant, on obtient une loi de probabilités dite « loi puissance », qui décrit parfaitement les données sauf une : la fortune de la reine d’Angleterre, qui dépasse de loin toutes celles de ses concitoyens. L’exemple n’est pas unique. Des physiciens comme Didier Sornette de l’ETHZ ont donc suggéré d’appeler de tels horsains des « dragons-rois ». Ces horsains sont donc des phénomènes dont l’intensité dépasse ce qui est vu ordinairement. S’ils sont « extra-ordinaires », ils ont toutefois leur propre logique, ce qui les rend prévisibles. C’est ainsi que si l’on applique ce concept à la bourse, il serait possible de prévoir l’effondrement des cours dès que des signes précurseurs ont été détectés. On comprend tout l’intérêt qu’une telle théorie peut susciter chez beaucoup de personnes.

Et les avalanches ?

Le comportement statistique des avalanches est un sujet important non seulement sur le plan scientifique, mais aussi pratique. En effet, la plupart des cartes de risque en Europe sont fondées sur une partition de l’espace en fonction de la fréquence et de l’intensité des phénomènes. Si la collecte des

données a commencé il y a plus d’un siècle en France et en Suisse, il a fallu attendre les années 1980 pour voir les premières études statistiques sur le comportement des avalanches extrêmes. En 1982, Paul Fohn et Roland Meister montraient ainsi que pour le couloir de Salezertobel à Davos, les distances d’arrêt des avalanches étaient distribuées selon une loi de Gumbel. Ce type d’études sur un couloir particulier reste assez rare car il est difficile de trouver des sites pour lesquels on a de longues séries de données et une information fiable et précise. Pour contourner cette difficulté, des chercheurs ont régionalisé les données en regroupant dans une même série des informations provenant de plusieurs couloirs d’un même massif. C’est ainsi que Dave McClung trouva que la loi de Gumbel décrivait correctement les distances d’arrêt en Colombie britannique (Canada) alors que pour l’Islande, Chris Keylock conclut que la distance d’arrêt était distribuée selon une loi de Fréchet, c’est-à-dire qu’il existait un seuil maximal que les avalanches ne dépassaient pas. Aucune étude statistique n’a mis en évidence des avalanches qui seraient des « dragons-rois ».

Une alternative aux modèles statistiques est constituée par les modèles dynamiques, qui permettent de calculer les caractéristiques des avalanches en résolvant des équations de la physique. Un modèle populaire est le modèle Voellmy-Salm-Gubler, implémenté dans les directives suisses de calcul des avalanches depuis 1990 (il est actuellement employé dans le modèle RAMMS commercialisé par l’institut SLF de Davos). Dans ce modèle, les avalanches extrêmes sont générées par des chutes de neige extrêmes (avalanches et accroissements du manteau neigeux sont donc supposés avoir la même période de retour). Dans ce cadre, une chute de neige exceptionnelle est donc éventuellement capable de produire une avalanche « dragon-roi ».

Enfin plus récemment, une troisième approche a émergé. On peut la qualifier d’approche stochastique ou conceptuelle. Elle

consiste à mélanger des outils statistiques et des modèles dynamiques pour simuler les avalanches. Des exemples sont donnés par les modèles stochastiques de Maurice Meunier ou Nicolas Eckert au Cemagref. Comme ces modèles se servent des données historiques existantes pour caler les paramètres internes, ils ne peuvent généralement pas prédire de phénomènes qui se démarqueraient des événements historiques connus.

Sur le plan théorique, il existe donc peu d'outils pour étudier ou prédire les horsains. Est-ce à dire qu'en pratique, le concept n'a que peu d'intérêt ? Ou bien qu'il n'y a pas suffisamment de preuves en faveur de leur existence ?

Concept actuel des avalanches extrêmes

La vision traditionnelle est que les avalanches extrêmes sont consécutives à des chutes de neige extrêmes. Certes, on reconnaît aussi que des circonstances tout autres peuvent amener à des avalanches exceptionnelles (avalanche due au redoux, avalanche retardée, etc.), mais l'idée généralement admise est que ce sont les chutes de neige qui expliquent le caractère exceptionnel des avalanches. Il est très facile de trouver des exemples ou de fortes chutes de neige ont causé des avalanches de très grande ampleur. Par exemple, en mars 1914, les fortes chutes de neige (2 m en 48 h à Argentière, 90 cm à Chamonix) ont causé une crue avalancheuse exceptionnelle, qui a causé des dommages très importants aux bâtiments et forêts de la vallée de Chamonix. La photographie 1 montre une vue des Frasses et la forêt dominant les Planards (avec les Aiguilles de Chamonix en arrière-plan), dévastée par plusieurs avalanches le 26 mars 1914.

On peut toutefois aussi trouver des exemples où des avalanches de grande ampleur ont été consécutives à des précipitations qui n'avaient pas de caractère exceptionnel. Par exemple, l'avalanche du Péclerey qui fit 12 morts à Montroc (Chamonix-Mont-Blanc) en février 1999 s'est produite à la suite d'une

chute de neige certes importante, mais pas exceptionnelle (la période de retour était de 5 ans). Le caractère exceptionnel s'explique essentiellement par une combinaison de facteurs défavorables (manteau neigeux peu consolidé à la suite de la longue période anticyclonique, transport de neige par le vent, température très froide, etc.). Comme dans tout système physique complexe, un phénomène exceptionnel peut être le résultat d'un malheureux concours de circonstances sans qu'aucun des processus impliqués (pris individuellement) ne revête de caractère exceptionnel. Il est donc intéressant d'examiner les raisons pour lesquelles certaines avalanches ont eu un caractère réellement « extra-ordinaire ».

Figure 1 : *le versant boisé dominant les Planards et le hameau des Frasses à Chamonix, dévasté par les avalanches du 26 mars 1914. Cliché G. Tairraz du 27 mars 1914 (fonds RTM de la Haute-Savoie).*

À la recherche des dragons-rois

En examinant les archives, on trouve plusieurs récits d'avalanches de très grande ampleur, dont l'analyse permet de dégager quelques mécanismes généraux qui expliquent le caractère extraordinaire des événements. On peut citer les mécanismes suivants (la liste n'est pas exhaustive) :

- La rugosité du terrain naturel est un paramètre qui influence grandement la dissipation d'énergie d'une avalanche. Le manteau neigeux adoucit souvent les irrégularités locales du terrain lorsque leur taille ne dépasse pas le mètre. Les macro-rugosités (blocs rocheux, coudes dans les couloirs, troncs d'arbre, etc.) exercent une résistance assez forte aux écoulements d'avalanche quelle que soit l'épaisseur du manteau neigeux, mais cette résistance peut diminuer significativement si le terrain est lissé par une avalanche antérieure ou bien par l'avalanche elle-même au cours de son écoulement (ce qui nécessite qu'elle mobilise un très grande volume de neige). Un exemple est donné par l'avalanche de mars 1923 à Tours-en-Savoie. L'abbé Gex en a fait un descriptif assez détaillé dans la Revue de Géographie Alpine ; l'avalanche aurait quasiment atteint les rives de l'Isère (350 m d'altitude) et formé des dépôts dont le volume dépasserait le million de mètres cubes. Si on applique le modèle de Voellmy pour calculer une telle avalanche, il faut prendre une valeur de frottement bien plus faible que le seuil communément admis, ce qui montre le caractère prodigieux de la distance parcourue par cette avalanche. La photographie 2 montre le site après une avalanche en 1999, qui est arrivée jusqu'au cône de déjection de Tours-en-Savoie. La langue de dépôt avait été arrêtée par une digue de protection torrentielle.
- La trajectoire d'une avalanche est généralement dictée par le relief. Naturellement, si la vitesse est grande,

les effets inertiels (dus aux forces centrifuges) peuvent donner des trajectoires quelque peu différentes. Il existe toutefois des circonstances où une avalanche peut sauter d'un couloir à un autre et prendre une direction radicalement différente. Un exemple est donné par l'avalanche du Péclerey, qui part sous le Bec du Lachat (2572 m d'altitude), puis prend la direction du Tour. En février 1999, elle a pris une direction très différente au niveau de l'ancien alpage appelé « montagne de Péclerey », en se dirigeant vers Montroc. Cette zone est constituée d'un relief moutonné à pente douce, qui est généralement peu favorable à un écoulement d'avalanche. En 1999, l'avalanche parvint à franchir cet obstacle, non sans perdre beaucoup de son volume et de son énergie. Arrivée vers 1900 m, l'avalanche a rencontré des pentes beaucoup plus soutenues et un manteau neigeux peu consolidé, deux facteurs qui expliquent l'accélération vigoureuse qu'elle a connue avant de balayer 20 maisons situées sur la rive opposée de l'Arve, à Montroc. La photographie 3 montre une vue du site avec les deux trajectoires d'avalanches issues du Bec du Lachat.

Figure 2 : *le site du Péclerey avec les deux trajectoires des avalanches partant sous le Bec du Lachat.*

- L'arrêt d'une avalanche est conditionné par une multitude de facteurs, dont la topographie locale, les propriétés mécaniques de la neige, et le volume de l'avalanche. Généralement, la forme et la localisation des dépôts peuvent être plus ou moins précisément prédites par le modèles ou à dire d'expert. Cependant, certaines avalanches ont formé des dépôts, dont l'extension était difficilement prévisible. C'est le cas par exemple lorsque plusieurs avalanches se produisent et modifient la topographie locale, par exemple en remplissant le lit d'un torrent ou le volume de stockage d'une digue paravalanche. Un exemple est donné par l'avalanche du 23 février 1999 à Geschinen (vallée de Conches, Suisse). En deux jours, trois avalanches de grande ampleur se sont produites. La première avalanche fut vraisemblablement un puissant aérosol, qui atteint

le Rhône. Dans sa zone de départ, l’avalanche vida également un lac naturel, dont les eaux contribuèrent à fortement humidifier le manteau neigeux composé de neige sèche et froide. Les deux avalanches suivantes mobilisèrent de la neige humide. Le dépôt épais et massif de la seconde avalanche agit comme une étrave en scindant la troisième avalanche en deux branches, dont l’une vint buter contre la digue haute d’environ 7 m protégeant Geschinen. Cette digue se révéla insuffisante à contenir plusieurs langues d’avalanche. Une partie de la neige déborda, entra dans une maison attenante, et y tua une personne. La photographie 4 montre une vue aérienne de Geschinen et des trois dépôts d’avalanche.

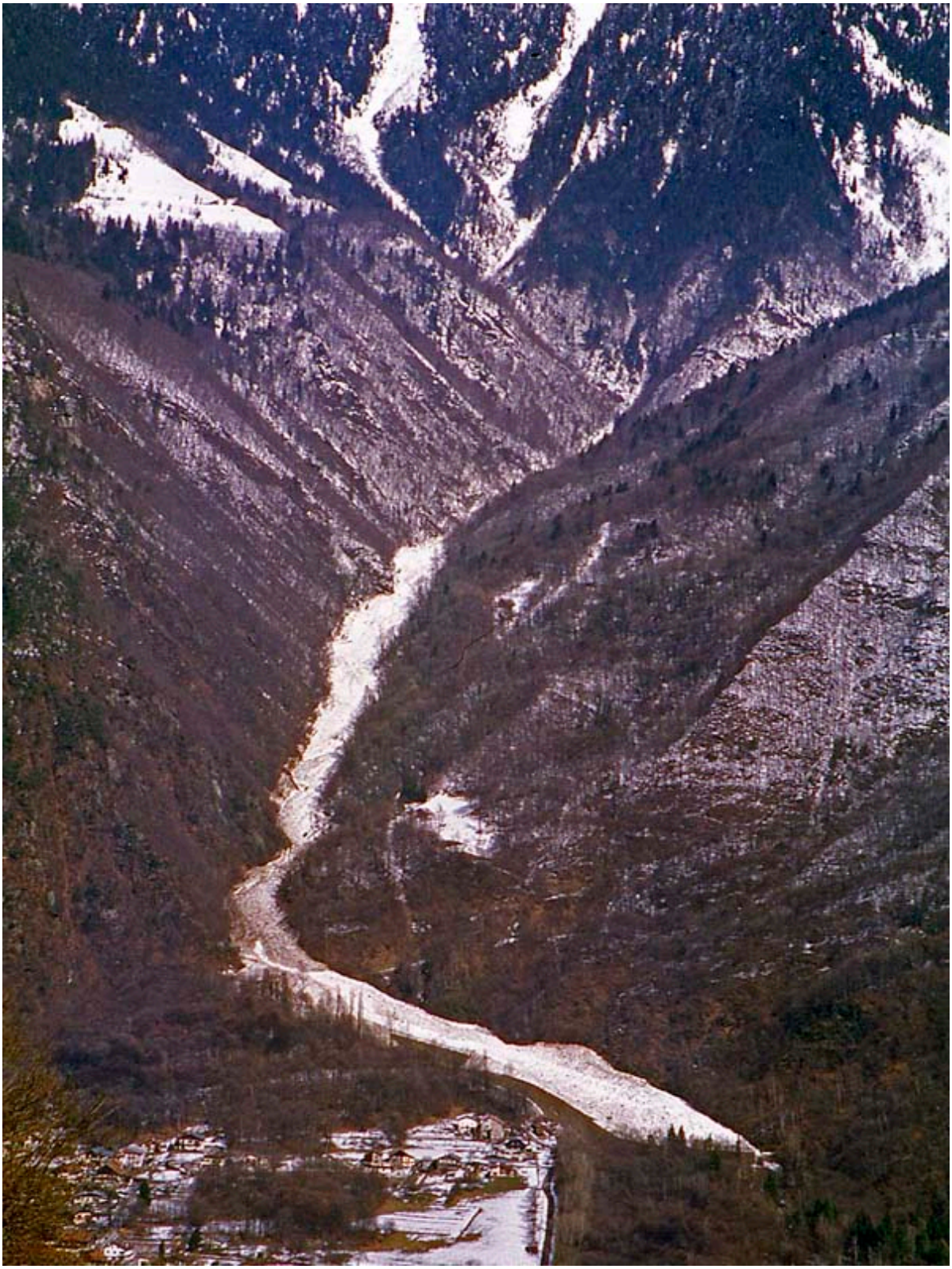
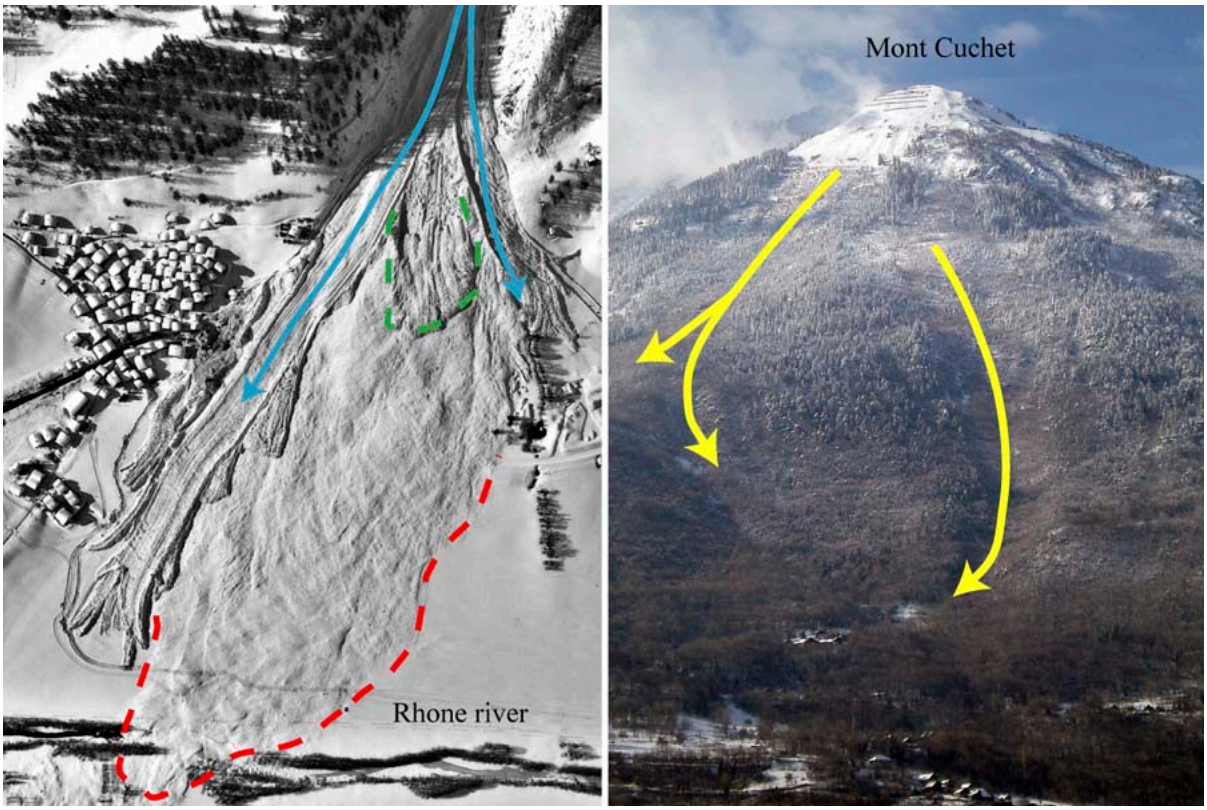


Figure 3 : *avalanche du Saint-Clément à Tours-en-Savoie (Savoie) en février 1999. Cliché de Stéphane Roudnistka (RTM de Savoie). L'avalanche partie dans le large versant ouest sous la Grande Journée et l'épaule sud du mont Mirantin s'est écoulée le long du lit encaissé du Saint-Clément avant d'être immobilisée dans la vaste plage de dépôt torrentiel.*

- La forêt est historiquement reconnue comme un obstacle efficace contre les avalanches en empêchant leur départ et/ou freinant leur propagation. Il existe toutefois de nombreux exemples de forêts balayées par des avalanches. C'est le cas par exemple d'un des hameaux de Saint-Étienne-de-Cuines, dont les habitants se croyaient protéger des avalanches par l'importante forêt qui s'étendait de la plaine de la Maurienne jusqu'aux abords du mont Cuchet, un sommet à l'allure débonnaire et à l'altitude modeste. Pourtant, en janvier 1981, une avalanche partie du Cuchet dévasta la forêt (qui avait été entaillée déjà par des avalanches en février 1978) et tua deux personnes, qui avaient refusé l'évacuation. La photographie 5 montre une vue actuelle du hameau du Tremble et de la forêt sous le mont Cuchet, où le passage des avalanches de 1981 sont encore bien visibles.



Figures 4 et 5 : *vue aérienne de Geschinen (gauche) [Office fédéral de la Topographie] et du mont Cuchet (droite). À Geschinen, la première avalanche (vraisemblablement*

sous forme d'un aérosol) a formé un dépôt diffus, étendu, et peu épais (enveloppe délimitée par le tireté rouge). La seconde avalanche s'est arrêtée brutalement à l'amont du cône de déjection (enveloppe délimitée par le tireté vert). La troisième avalanche s'est scindée en deux branches (signalées par une flèche bleue), dont l'une a touché le village malgré la digue paravalanche. Le hameau du Tremble à Saint-Étienne-de-Cuines a été touché en janvier 1981 par des avalanches issues du mont Cuchet.

Le caractère remarquable de ces avalanches réside dans leur capacité à modifier le système physique dans lequel elles évoluaient. Qu'ils soient statistiques ou dynamiques, les modèles d'avalanches considèrent toujours qu'une avalanche est un écoulement de neige qui s'écoule dans un site bien défini. Il existe des conditions, que le physicien appelle « conditions aux limites » qui décrivent les contraintes auxquelles sont soumises les avalanches : la rugosité du fond, la pente locale, la possibilité d'entraîner de la neige en érodant le manteau neigeux, etc… Ces conditions sont fixées et indépendantes des avalanches… sauf pour les avalanches « dragons-rois », qui sont suffisamment importantes pour modifier les conditions aux limites. Pour illustrer cela avec une image, on peut comparer les avalanches à des joueurs de cartes. La plupart des joueurs respectent les règles, leur gains sont donc prévisibles et limités, mais il existe des joueurs, qui au cours d'une partie, vont modifier les règles du jeu, avec à la clé des gains très élevés. Ces nouvelles règles ne sont toutefois par arbitraires ; elles obéissent simplement à une logique différente des règles usuelles.

Quelles conséquences pour le zonage d'avalanche ?

Le principal intérêt du concept des dragons-rois est de jeter un éclairage nouveau sur les valeurs extrêmes en les

distinguant selon leurs origines.
Appliqué aux avalanches, ce concept énonce deux choses :

- il existe des avalanches extrêmes, dont les caractéristiques sont, d'un point de vue statistique, en continuité avec les phénomènes ordinaires et rares que connaît le site étudié. Il est raisonnable de penser que la plupart des modèles actuels (statistiques ou dynamiques) peuvent en calculer les caractéristiques à partir de la connaissance de l'activité avalancheuse passée du site ou bien par comparaison avec des sites similaires ;
- il existe des avalanches extrêmes, dont les caractéristiques se démarquent nettement des avalanches connues sur le site étudié. Ces avalanches constituent une population à part et il est peu probable que la connaissance de l'historique du site permette de fournir une image correcte de leur dynamique. Il faut au contraire imaginer les scénarios analysant les différentes façons dont des avalanches pourraient s'affranchir des conditions aux limites imposées par le site pour imposer leurs propres conditions. Il ne s'agit pas toutefois de laisser libre cours à des élucubrations. Les processus qui permettent à une avalanche de s'affranchir des « règles du jeu » sont peu nombreux et ne peuvent sans doute pas se produire sur tous les sites. Ce sont de nouvelles règles qui émergent, non l'absence de règles.