

# *Avalanches : une approche rationnelle dans la gestion du territoire ?*

Christophe Ancey

École Polytechnique Fédérale de Lausanne  
Faculté *Environnemental Naturel, Architectural et Construit*

EPFL : Mondial A<sup>3</sup>, 6 juin 2009

[christophe.ancey@epfl.ch](mailto:christophe.ancey@epfl.ch)

## Plan de la conférence

---

- Pourquoi étudier les avalanches ?
- Approche historique
- Approche naturaliste
- Approche mécanique/statistique
- Synthèse rapide

# Pourquoi étudie-t-on les avalanches ?

---

## Quelques éléments :

- Une demande croissante : augmentation du trafic et volonté d'ouverture des routes.
- Urbanisation dans des secteurs exposés : peut-on « habiter la menace » (Inès Lamunière) ? Concevoir des structures habitables. « Un terrain exposé n'est pas un terrain à bâtir » dit pourtant la Confédération.
- 1,5 milliards de francs investis en protection depuis 1951 par la Confédération et les cantons. Un budget fédéral d'entretien (forêt, claies, etc.) conséquent : 16 millions/an.
- Hiver 1999 : malgré l'état d'urgence et des avalanches extrêmes causant 17 victimes (plus de 70 à l'échelle des Alpes), février 1999 a montré l'efficacité de la stratégie de protection : zonage, forêt, et ouvrages de génie civil. 300 millions de dommages, sans doute le double en pertes économiques.

# Des problématiques différentes

Deux problématiques distinctes :

- Prévoir les avalanches au sens météorologique : quelles pentes sont dangereuses aujourd'hui ? On veut déterminer la stabilité du manteau neigeux en fonction des conditions nivo-météorologiques. Boîte à outils : mécanique des solides et géomécanique, mécanique de la fracture, météorologie, analyse statistique de type « plus proches voisins ».
- Prédire les avalanches : est-ce que cet équipement peut un jour être touché par une avalanche ? On veut calculer les caractéristiques des écoulements (vitesse, extension) et leur probabilité d'occurrence. Boîte à outils : dynamique des fluides, théorie des valeurs extrêmes, système d'information géographique (SIG).



# Zonage et occupation du sol

Comment réguler et planifier l'occupation du sol ? Une longue histoire :

- jusque dans les années 1970, pas de réglementation spécifique. Des ouvrages de génie civil en nombre croissant pour protéger les enjeux... Une vision essentiellement qualitative des dangers et une approche empirique pour faire face au danger d'avalanche au cas par cas ;
- des hivers catastrophiques qui interrogent (1951, 1954, 1968). Création d'un groupe de travail à Davos (SLF) dès les années 50  $\rightsquigarrow$  idée d'un zonage tricolore ;
- un électrochoc : l'hiver meurtrier de 1970 (Reckingen, VS, 30 morts ; Val-d'Isère, Savoie, 38 morts).

En parallèle :

- fiabilité et sécurité des systèmes industriels avec le passage d'une vision essentiellement déterministe (théorie du maillon faible) à une vision probabiliste (théorie des concours de circonstances, théorie du renouvellement) « if anything can go wrong, it will » (loi de Murphy) ;
- en hydraulique, classement des crues selon leur période de retour : il existe une relation entre débit de pointe  $Q$  et période de retour  $T$ , qui permet de définir une relation intensité/fréquence du risque de crue.

# Risque accepté, risque acceptable

On ne se protège pas contre tous les dangers. Il y a un seuil de risque au-delà duquel on ne peut pas construire. Ce seuil est défini « en théorie » à travers une relation entre *intensité  $I$*  et *fréquence/période de retour  $T$* .



L'intensité  $I$  reflète la capacité de dommage ; en général on choisit la pression d'impact. La période de retour se calcule le plus souvent en fonction de l'extension de l'avalanche (distance d'arrêt). Le zonage consiste donc à rechercher la relation  $I(T)$  entre intensité et fréquence d'occurrence sur un territoire donné et en fonction du risque accepté de proposer une délimitation des zones constructibles.

# Période de retour

Qu'est-ce qu'une avalanche centennale ?

C'est une avalanche dont la période de retour est  $T = 100$  ans. Cela veut dire :

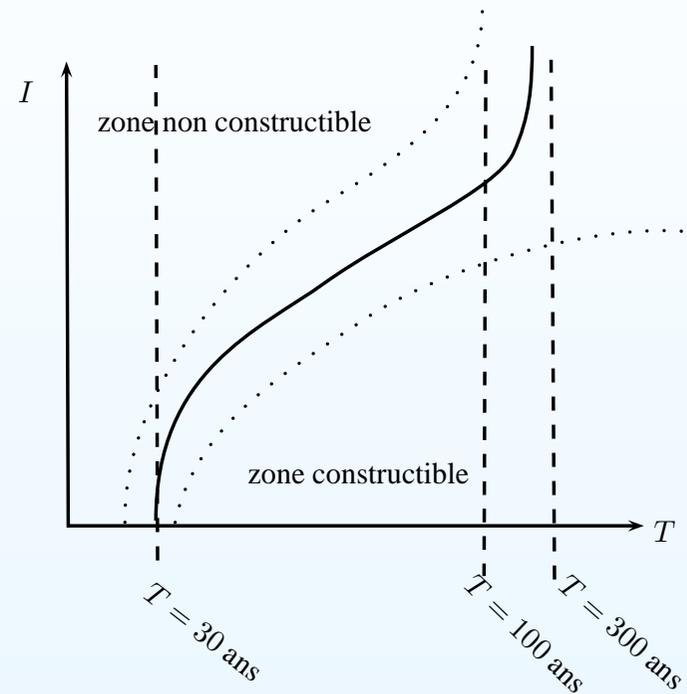
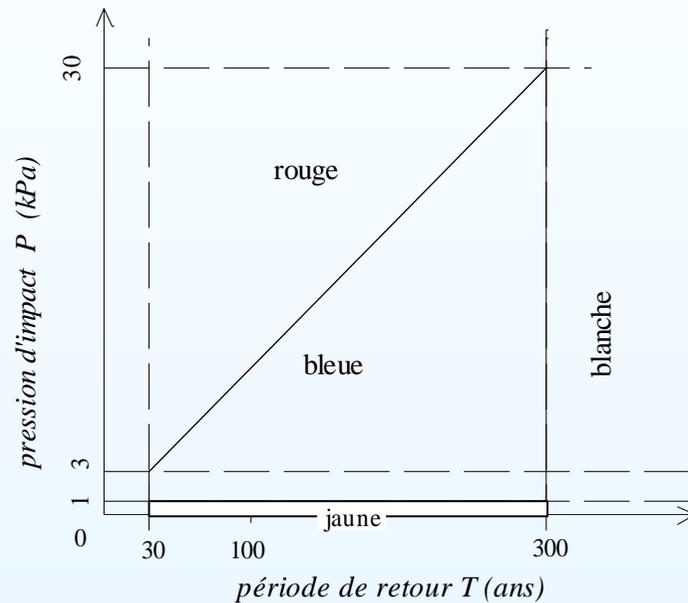
- en moyenne chaque année, il y a une probabilité  $P = 1/T = 1\%$  d'observer une avalanche d'une certaine intensité ou d'une intensité supérieure ;
- en moyenne la durée entre deux événements centennaux est 100 ans.

Imaginez une urne avec 99 boules blanches et une boule noire, dont on tire aléatoirement des boules une par une (avec remplacement). En moyenne, on est sûr de tirer 1 boule noire tous les 100 tirages, mais il s'agit d'une moyenne. En pratique, la théorie des probabilités (loi binômiale) nous dit que la probabilité qu'au cours des 100 prochaines années

- on n'observe rien est de 36 % ;
- on observe au moins 1 avalanche centennale est de 64 % ;
- on observe au moins 2 avalanches centennales est de 26 % ;
- on observe au moins 3 avalanches centennales est de 8 % ; etc.

**Questions :** comment fait-on en pratique pour établir cette relation  $I(T)$  et quelles en sont les limites ?

# Usage suisse



**À gauche** : schéma de principe (tiré de Salm *et al.*, *Berechnung von Fliesslawinen*, SLF Bericht 47, Davos, 1990). **À droite** : schéma pratique où l'appréciation des limites est plus floue/incertaine. Une zone rouge est une zone « fréquemment » ( $T < 30$  ans) ou bien rarement, mais avec une intensité forte. L'échelle d'intensité est la pression d'impact ( $10 \text{ kPa} \approx 1 \text{ t/m}^2$ ). L'incertitude croît avec  $T$ .

# Règle française

Aléa de référence ⇔	Centennale (rare)	Maximale vraisemblable (exceptionnelle)
Intensité ↓		
$P \geq 30 \text{ kPa}$	A3	AMV
$1 \text{ kPa} < P < 30 \text{ kPa}$	A2	
Faible et non quantifiable, $0 \text{ kPa} < P < 1 \text{ kPa}$ , purges de talus ...	A1	

Zonage réglementaire  
Principe de délimitation, de constructibilité et de gestion

Aléa	Espaces non urbanisés	Espaces urbanisés	
		non protégés	protégés
Fort A3	Inconstructible	Inconstructible + limitation des arbres	Inconstructible + exceptionnellement constructible sous conditions strictes) + limitation des arbres
Moyen A2	Inconstructible	Inconstructible (exceptionnellement constructible sous conditions de mise en œuvre des mesures de prévention) + limitation des arbres	Constructible sous condition d'entretien des ouvrages de protection + limitation des arbres
Zone non exposée source d'aléa	Inconstructible + Sylviculture pour une forêt à fonction de protection	Constructible sous condition de prise en compte de mesures individuelles de prévention	Constructible sous condition d'entretien des ouvrages de protection
Faible A1	Sylviculture pour une forêt à fonction de protection Constructible sous condition de prise en compte de mesures individuelles de prévention	Constructible sous condition de prise en compte de mesures individuelles de prévention	Constructible sous condition d'entretien des ouvrages de protection
AMV	Constructible avec une réglementation pour les équipements nécessaires à l'organisation des secours		
Négligeable ou nul mais accès menacés			

Pour l'ensemble des zones: mise en oeuvre d'un plan de surveillance, d'alerte et d'évacuation

En France, la règle est de recourir à un phénomène de référence (avalanche centennale) pour qualifier « l'aléa » (= le phénomène physique). Tableaux tirés de Liévois, *Guide méthodologique PPR avalanches* (non publié, mais en ligne sur [www.prim.net](http://www.prim.net), 2003).

# Approche historique

---

Le travail dans les archives, les bases de données, ainsi que l'enquête auprès des riverains et l'analyse du terrain (p. ex., traces dans la végétation) permettent d'obtenir une idée grossière de la relation intensité/fréquence.

La collecte de témoignages reste la première source d'informations dans l'élaboration des plans de zonage. En France, les guides méthodologiques PPR mettent l'accent sur le recueil d'informations historiques pour élaborer les plans de zonage. Cette méthode est jugée la plus sûre car fondée sur des éléments objectifs du passé.

Mais est-ce le cas ?

« Il est naïf d'imaginer qu'un témoignage sera d'autant plus précieux pour l'historien qu'il adhèrera de plus près à l'événement (...) : le témoin était-il bien placé pour observer ? S'est-il donné la peine de bien observer ? N'a-t-il pas été victime d'une hallucination, d'une illusion, d'un préjugé ? Le fait affirmé était-il observable ? » (H.-I. Marrou, *De la connaissance historique*, le Seuil, 1954).

# Limites du témoignage

Un exemple donné par Jean-François Meffre (expert en avalanche andorran). L'enquête concerne la route d'accès à Notre-Dame-la-Salette (Isère). Elle a été menée auprès des mêmes personnes à douze ans d'intervalle.



## Contrefort sud-est du Gargas

- 1987. Père et frère : « la pente n° 1, qui domine le parking donne de petites coulées tous les ans ».
- 1999. Le père : « jamais rien observé ici ». Le frère : « des coulées sont descendues 3 ou 4 fois, en faisant des dépôts de 4 à 5 m ; elles viennent d'assez haut. »

# Limites du témoignage

---

## Avalanche du Pont de la Tape

- 1987 Le père se souvient qu'une avalanche coupa la route en 1984, en accumulant jusqu'à 7 m de neige sur 40 à 50 m de long. Il n'a jamais pu voir la zone de départ.
- 1999 Le père : « ne se souvient pas d'avalanche ici ». Le frère a vu 3 avalanches après de grosses chutes de neige (dont une en 1998). Elles coupent le virage sur 22 m de chaque côté. Il ne les a jamais vues en neige humide de printemps.

## Morale :

- rechercher toujours plusieurs témoins ;
- interroger *in situ* (jamais sur carte) ;
- se méfier des dates indiquées (sauf exception) ;
- relativiser la « fréquence » d'événements anciens.

(A.-M. Granet-Abisset & G. Brugnot, *L'avalanche et le risque : regards croisés de l'ingénieur et de l'historien*, édition MSH-ALPES, 2001).

# Lanslevillard

Une avalanche exceptionnelle le 24 février 1970 :

- huit morts, dix blessés ;
- cinq bâtiments détruits ou gravement endommagés dont un hôtel (le « Grand Signal ») fortement endommagé ;
- cinq autres endommagés dont l' « Hôtel des Glaciers » ;
- la route nationale (appelée alors RN 202) coupée sur 300 m par un épais dépôt.



## Lanslevillard : version officielle

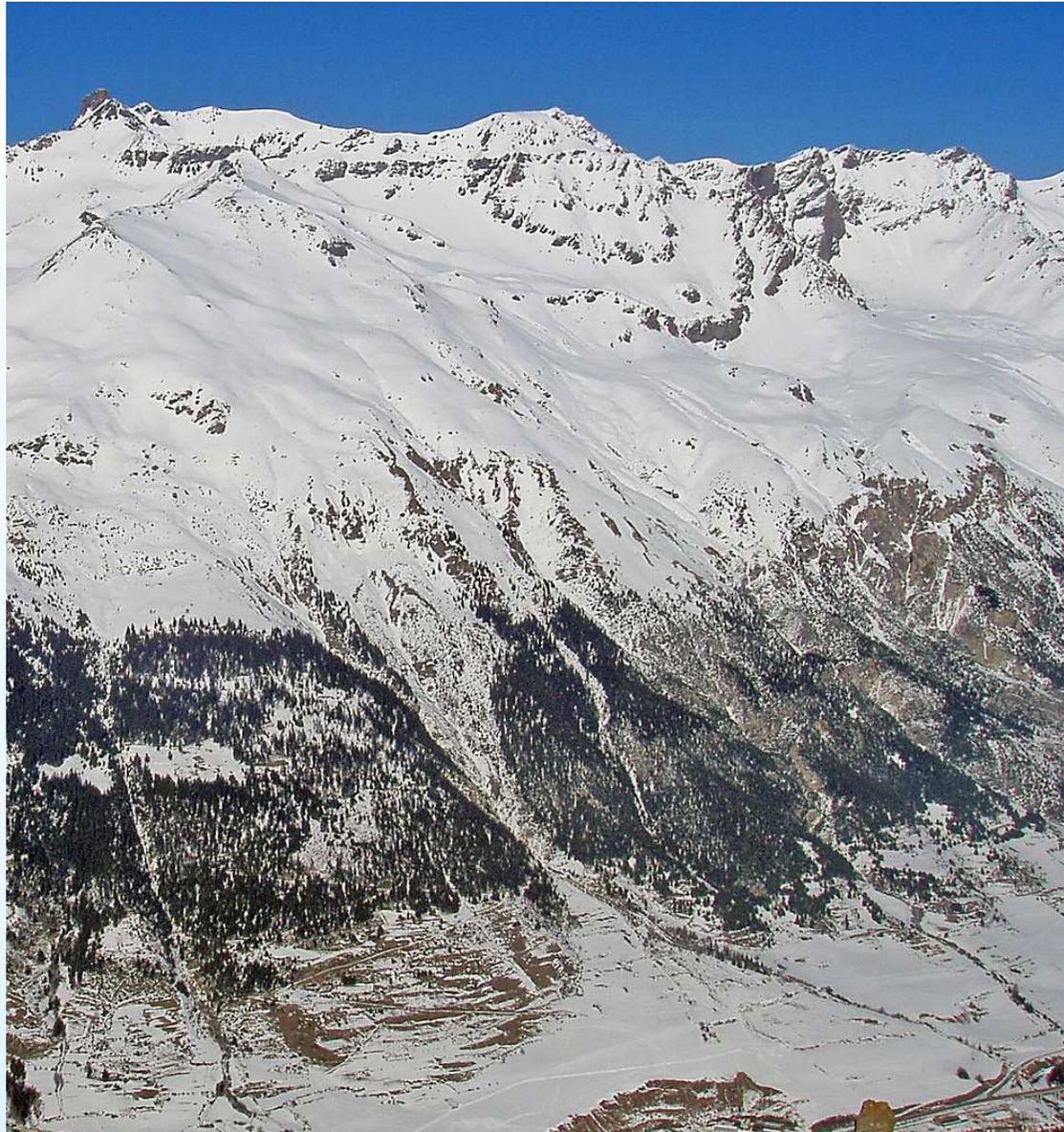


Source : Lucien Ancherri (RTM-73)

Interprétation de l'époque : l'avalanche est partie du Grand Roc Noir, n'a pas pris son chemin habituel par le ravin de Pisselerand, mais a emprunté le ravin du Pichet.

# Lanslevillard : contre-enquête

---



# Lanslevillard : contre-enquête



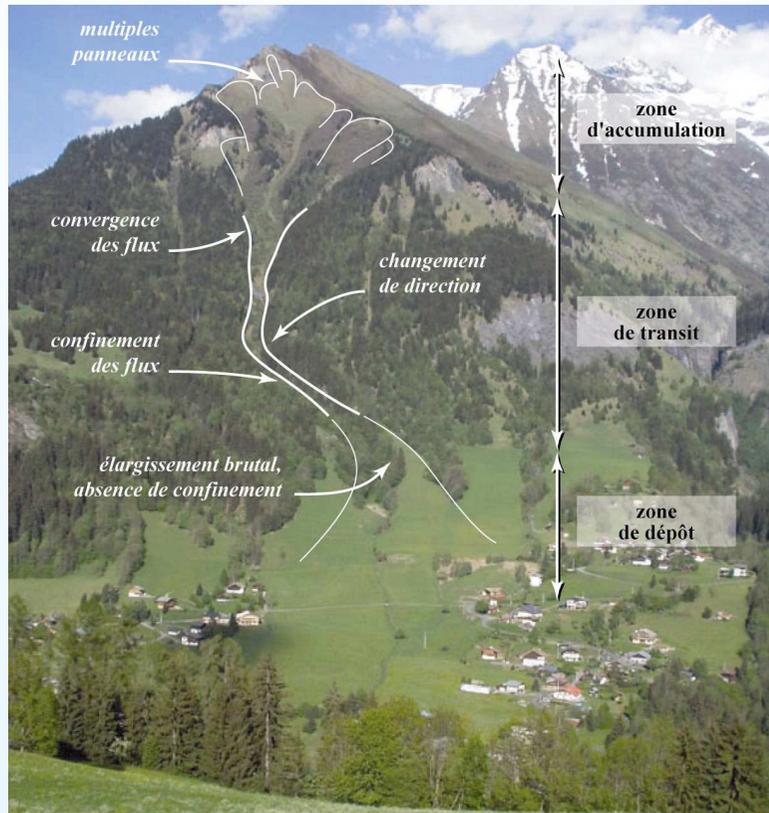
# Lanslevillard

---

Reconstituer une avalanche à partir de ses effets (dépôt visible, dommage, etc.) est difficile. Ainsi, dans le cas de l'avalanche de Montroc (9 février 1999, 12 morts) dans la vallée de Chamonix, nous disposons de tous les éléments possibles, mais il a fallu attendre la fin de l'hiver pour se rendre compte que l'avalanche était allée encore bien plus loin que ce que nous avons établi le lendemain de la catastrophe. C'est la fonte des neiges qui a montré que les dépôts d'avalanche s'étaient formés quelques dizaines de mètres plus loin !

*A fortiori*, analyser une avalanche exceptionnelle des années après qu'elle s'est produite est une gageure. À Lanslevillard l'analyse des éléments objectifs (photographies aériennes et clichés divers) raconte une histoire tout autre que ce que les témoins ont rapporté. L'exemple illustre donc encore une fois que l'analyse critique des témoignages historiques n'est pas une vaine entreprise même lorsqu'ils semblent plausibles.

# Approche naturaliste



Couloir de la Vilette (Saint-Gervais, Haute-Savoie)

L'approche naturaliste est une analyse d'un site où l'on conceptualise le fonctionnement avalancheux par un examen attentif des critères d'enneigement, de relief, de rugosité pour établir une estimation de la relation intensité/fréquence. Elle repose beaucoup sur l'expérience du praticien et la base de phénomènes/sites analogues qu'il a pu étudier. Elle est aussi fondamentalement dépendante de notre credo.

## Limites du savoir naturaliste

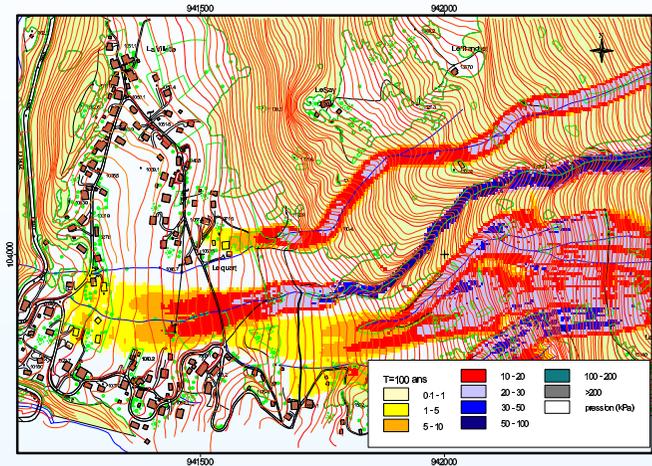


La description des avalanches débuta sérieusement à la fin du XIXe siècle (voir Rabusseau, *Les neiges labiles*, Presses d'Histoire Suisse, 2007). Nos connaissances ont beaucoup évolué, les anciennes théories font sourire, mais... que penseront les prochaines générations de nos théories actuelles ?

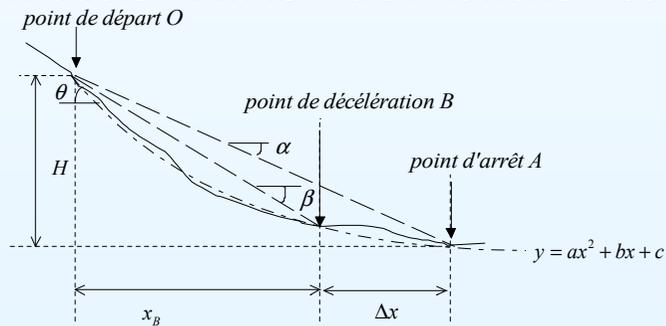
## Quelques évolutions de la pratique

- jusque dans les années 1980, l'analyse des dangers est chasse-gardée des organismes d'état (SLF en Suisse + services cantonaux, RTM + Cemagref en France), avec quelques rares ingénieurs (comme le Genevois André Roch) proposant leurs services (surtout aménagement de station) ;
- dans les années 1980 et le début des années 1990, le nombre de praticiens spécialisés augmentent (J.-F. en Andorre, M. Heimgartner, puis H. Gübler, D. Issler, A. Burkard, R. Bolognesi en Suisse) ;
- un changement dans les pratiques, principalement venu de l'exemple de l'hydrologie et insufflé par le SLF (B. Salm)  $\rightsquigarrow$  apparition de petits modèles de calcul, calcul statistique de période de retour ;
- les années 1980–95 sont dominées par une vision « veni vidi vici » (l'expert vient et propose sa solution de protection, les rapports sont lapidaires, se bornant le plus souvent à une description de la géographie du site et à la protection envisagée) ;
- année 1990 : montée en puissance des outils de calcul (statistique, dynamique). Emergence de concepts plus complexes de zonage (en France on passe des PZEA aux PER, puis aux PPR). Analyse des solutions et rôle croissant du maître d'ouvrage comme preneur de décision ;
- années 2000 : multiplication des acteurs (bureaux de géologues, de géotechniciens, de maîtrise d'œuvre, guides de montagne) et fin de monopole des acteurs historiques (SLF en Suisse, Cemagref/RTM en France).

# Approches mécanique et statistique



modèle AVAC d'avalanche coulante

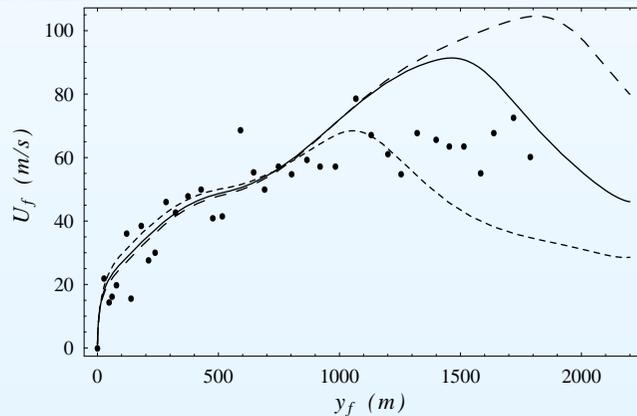


modèle de Lied et Bakkehøi

La relation intensité/fréquence peut être déterminée par le calcul à l'aide

- modèle numérique de dynamique des écoulements ;
- modèle statistique de corrélation (méthode dite norvégienne) ;
- théorie des valeurs extrêmes, simulations MCMC.

# Quelques beaux succès

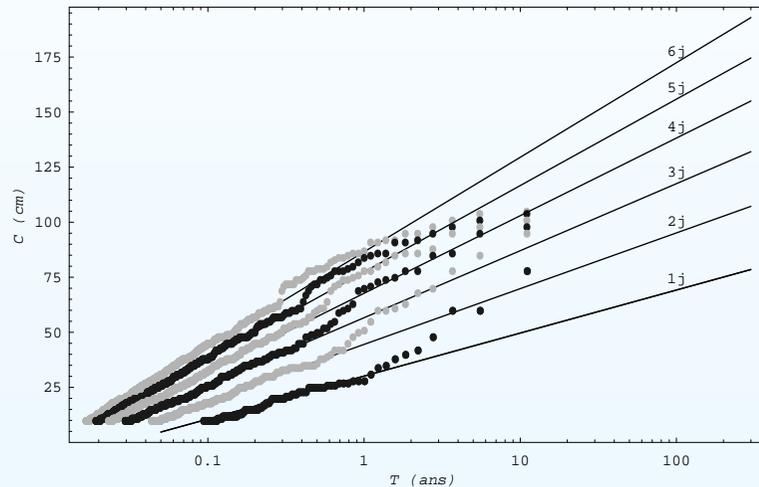


vitesse du front en fonction de la quantité de neige entraînée

Avec des modèles relativement simples, on sait

- calculer des vitesses de propagation ;
- évaluer les pressions d'impact ;
- quantifier des fréquences d'occurrence.

## Et quelques problèmes ennuyeux...



Chutes de neige sur 1 jour, 2 jours, etc., à Bonneval-sur-Arc en fonction de la période de retour  $T$  (série 1994–2008)

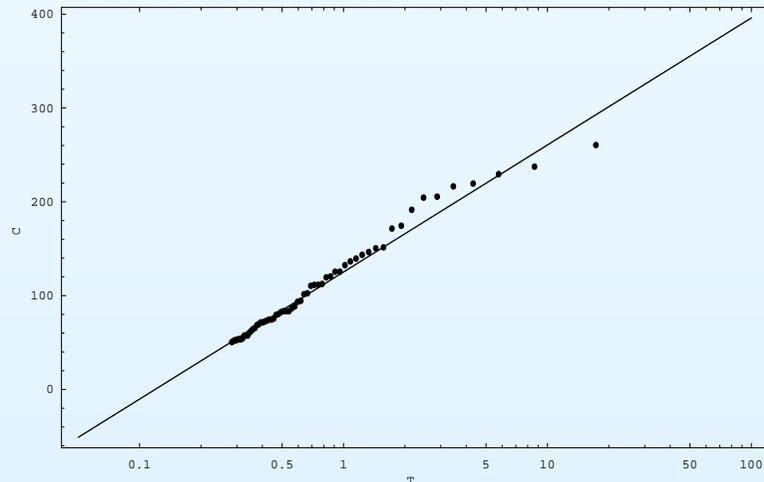
La théorie (des valeurs extrêmes) nous dit que le passé renseigne sur le futur car les extrêmes ne sont pas quelconques, mais distribués selon une loi précise (Fréchet, Gumbel, ou Weibull). Quand une donnée ne colle pas avec la théorie, on parle de *outlier* ou de *horsain*, c'est-à-dire une anomalie. Cependant les cas d'exception sont légion... Sont-ce encore des exceptions?

Exemple de Bonneval-sur-Arc: 5 avril 1969  $C = 160$  cm sur 24 h (130 mm équivalent en eau); 147 cm à Bessans. Quelle période de retour?

# Montroc...



Maison détruite par l'avalanche du 9 février 1999 à Montroc



Chute du neige du 6 au 10 février 1999 :  
225 cm, soit  $T = 3 - 5$  ans.

Une avalanche peut résulter de chutes de neige extrêmes ou bien d'un concours de circonstances exceptionnel. Comment quantifier ce dernier ?

## Avalanches en laboratoire

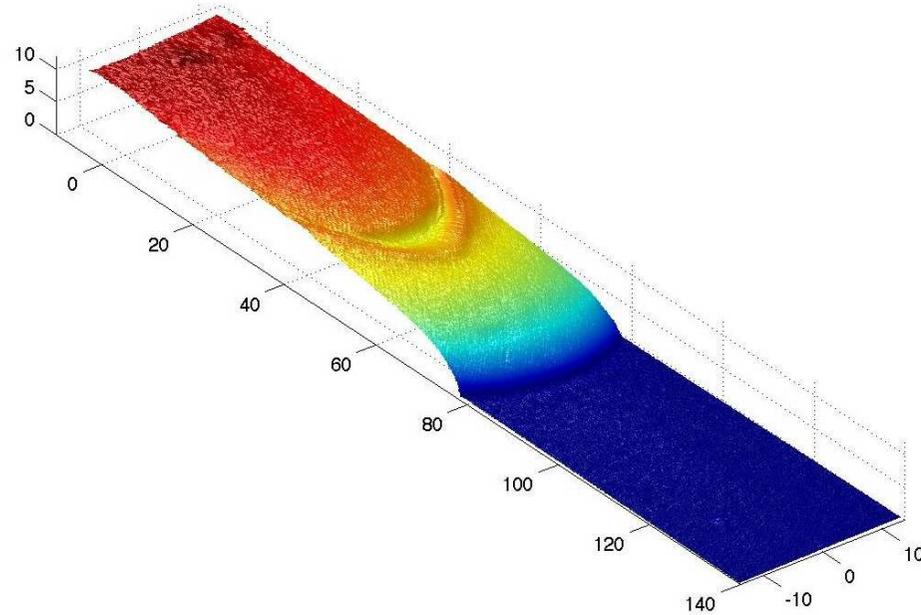
---

Avalanches en laboratoire : comment tester notre capacité de prédiction ?

- Expériences reproductibles.
- Conditions initiales et aux limites maîtrisées.
- Propriétés mécaniques connues et pouvant être changées.
- Topographie connue.

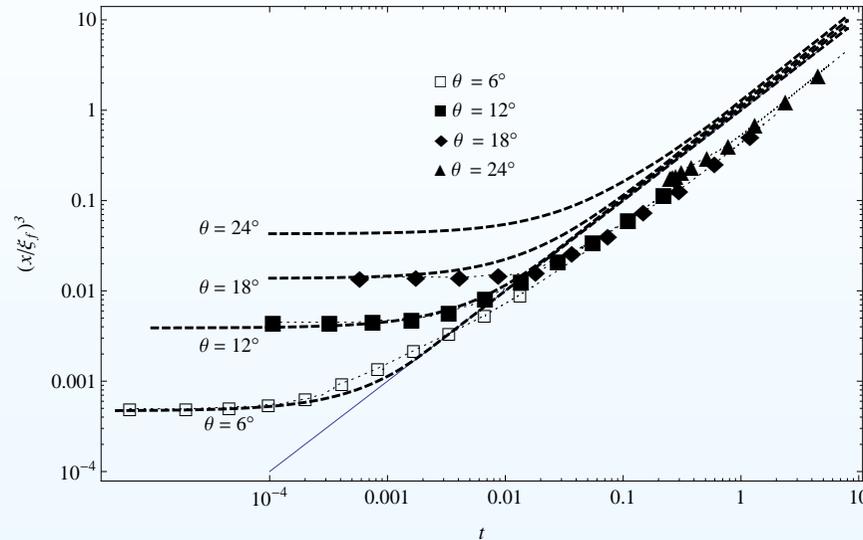
Quelques problèmes : rapport aux écoulements naturels (similitude), effets perturbateurs, etc.

# Reconstruction de la surface libre de l'écoulement



Thèses Steve Cochard, Sébastien Wiederseiner, Martin Rentschler, & Nicolas Andreini (EPFL/ENAC/LHE).

# Application aux avalanches de fluide newtonien



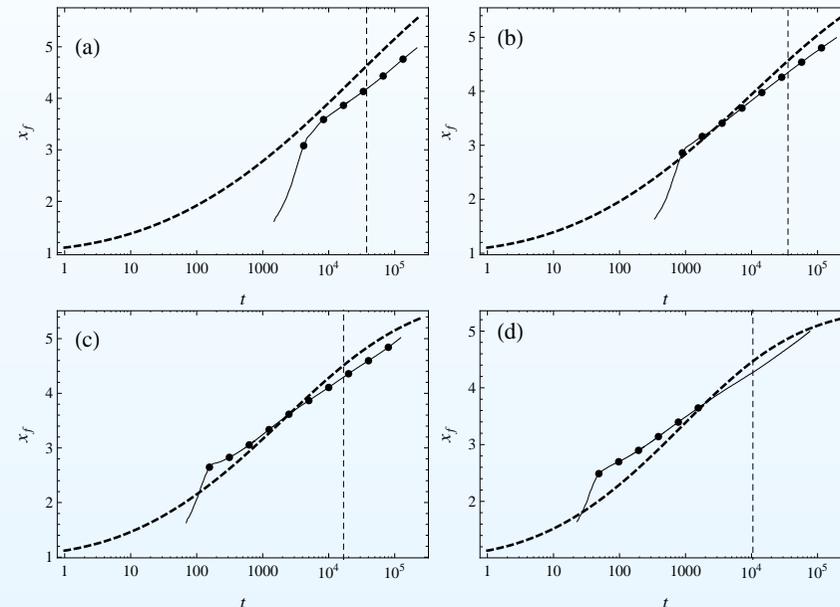
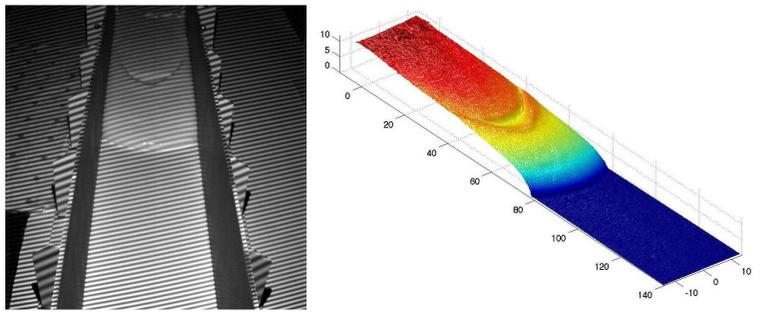
Evolution de la position du front (normalisée)  $(x_f/\xi_f)^3$  dans un diagramme log-log : les données expérimentales correspondant aux pentes  $\theta = 6^\circ$ ,  $12^\circ$ ,  $18^\circ$ , et  $24^\circ$  sont reportées. La ligne continue  $(x_f/\xi_f)^3 = t$  correspond à la solution auto-similaire.

Fluide : glycérol  $\mu \sim 345$  Pa.s (caramel!)

Ancey *et al.*, *J. Fluid Mech.* **624** (2009) 1–22

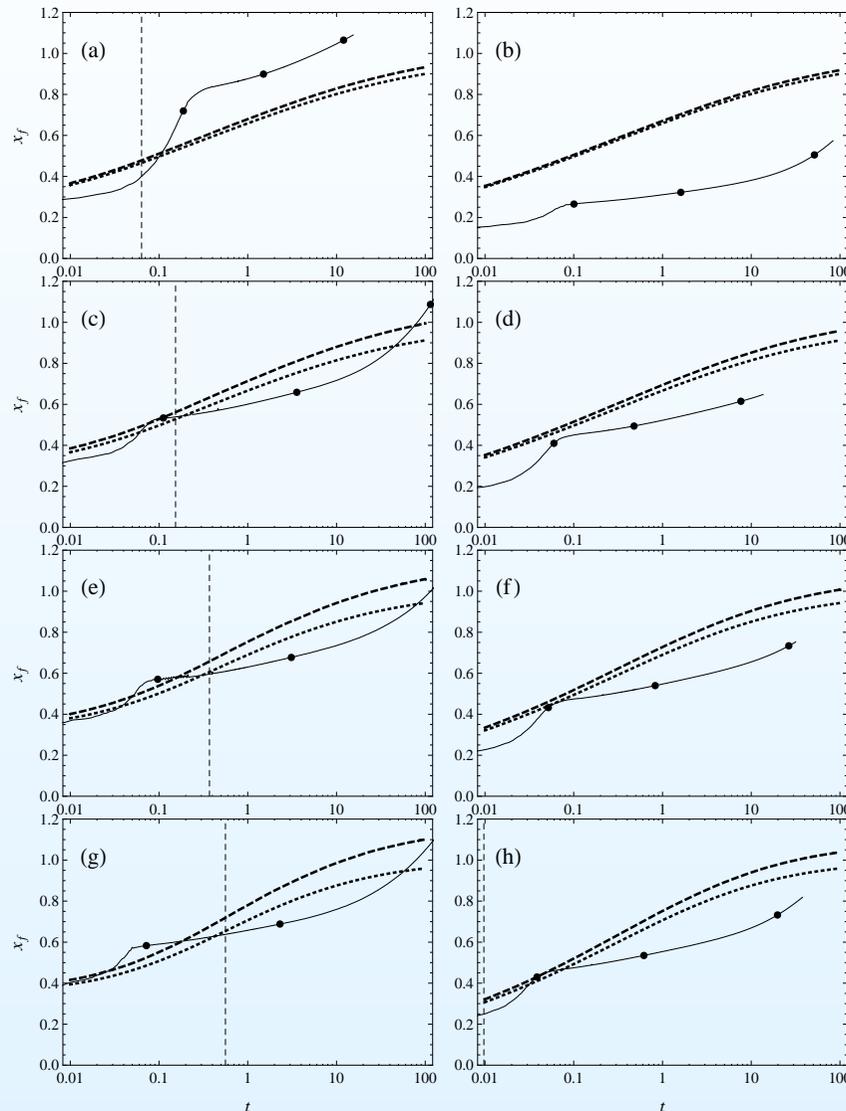
# Application aux avalanches viscoplastiques (1)

Les mêmes techniques peuvent être employées pour les matériaux viscoplastiques.



Évolution de la position du front pour  $\theta = 24^\circ$ . Expériences avec du Carbopol à des concentrations différentes. Courbes tiretées : prédiction d'un modèle théorique à l'ordre 0 (équation de convection-diffusion non linéaire). Ancy & Cochard, *J. Fluid Mech.* **624** (2009) 1–22

## Application aux avalanches viscoplastiques (2)



Évolution de la position du front pour  $\theta = 12^\circ$ . Expériences avec du Carbo-pol à des concentrations différentes. Courbes tiretées : prédiction d'un modèle théorique à l'ordre 0. Ancy & Cochard, *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* **158** (2009) 18–35

# Conclusions

---

- Plus d'un siècle de recherches... Un accroissement constant des connaissances. La Suisse a eu un rôle de pionnier qui a influencé la gestion des risques à l'échelle de la planète.
- Localement des problèmes sérieux : dispositif paravalanche mal conçu, zonage médiocre ou pas accepté par les habitants (à tort ou à raison), etc.
- Aucune approche à elle-seule ne peut prétendre constituer la bonne méthode. Il faut faire feu de tout bois et marier les approches.
- L'expertise du danger d'avalanche est pratiquée essentiellement individuellement alors que marier les approches nécessitent des compétences pointues dans des disciplines très différentes et donc une expertise collective.
- Quelle place pour « l'expert multirisque ». Rôle similaire à un généraliste en médecine : utile pour un tableau général, mais insuffisant pour des pathologies plus sérieuses.